



Universidad
Tecnológica
de Pereira



**CUANTIFICACIÓN DE IMPERFECCIONES CONTROLADAS
MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TERMOGRAFÍA DE FASE
PULSADA A IMÁGENES DE UNA MUESTRA PATRÓN DE POLY-
METILMETACRILATO**

Autor: Miguel Ángel Cifuentes Marín

Director: Ph.D Milton Humberto Medina Barreto

Ingeniería Física

Facultad de Ingenierías

Universidad Tecnológica de Pereira

Trabajo de grado presentado para optar al título de:

Ingeniero Físico



“Everyone who is seriously involved in the pursuit of science becomes convinced that a spirit is manifest in the laws of the universe--a spirit vastly superior to that of men...”
[“Albert Einstein: The Human Side”, Princeton University Press]

“All human discoveries seem to be made only for the purpose of confirming more and more strongly the truths in the sacred scriptures.” [Sir William Herschel][Quoted by H.H. Halley 1965, “Halley's Bible Handbook” 24th ed., p.19]

When I wrote my treatise about our Systeme, I had an eye upon such Principles as might work with considering men for the believe of a deity & nothing can rejoyce me more than to find it usefull for that purpose.” [Isaac Newton. See Hummel 1986]

Dedicatorias

“Agradezco infinitamente a Aquel que es el principio y el fin, quien no está limitado por el tiempo o por el espacio, por hacer que todo funcione tan armoniosamente, por llamarme y permitirme conocerlo mediante la ciencia”.

A mis padres y hermanos por depositar todo lo que han podido en mí.

A toda mi familia por confiar plenamente en que este es un primer acercamiento a otras metas por cumplir.

AVRAPSE...

A todo Zoe.

Agradecimientos

Al Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales (GIMM) de la Universidad Tecnológica de Pereira y a su directora PhD. Beatriz Cruz por abrir sus puertas para la realización de este trabajo de grado y aportar de su experiencia y conocimientos.

Al profesor Milton Humberto Medina Barreto por compartir su tiempo, conocimiento, experiencia y disposición, ya que gracias a su dirección y sabias críticas fue posible la culminación y construcción del presente trabajo.

A los integrantes del GIMM que estuvieron siempre prestos a escuchar avances y errores, con el fin de aportar en discusiones y soluciones, sobre diferentes problemas y resultados.

Al profesor Walter Serna por brindar de su tiempo y formación para la orientación en el procesamiento de datos.

A los de séptimo por hacerme crecer y mejorar enormemente.

A todos los compañeros de carrera por haber participado conjuntamente en trabajos y clases, de ellos fue posible aprender demasiado.

Cuantificación de Imperfecciones Controladas mediante la Aplicación de Termografía de Fase Pulsada a Imágenes de una Muestra Patrón de Poly-metilmetacrilato

1. Introducción

1.1. Justificación.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.4. Estructura de la tesis.....	4

2. Fundamentación teórica

2.1. Termodinámica Básica.....	6
2.2. Radiación electromagnética.....	7
2.3. Propagación térmica de una onda.....	9
2.4. Transformada de Fourier.....	10
2.5. Termografía Infrarroja.....	11

3. Metodología experimental

3.1. Descripción de los elementos del sistema.....	14
3.2. Montaje experimental.....	21
3.2.1. Caracterización de las lámparas halógenas.....	21
3.2.2. Modo reflexión y transmisión.....	23
3.3. Procesamiento de imágenes.....	24
3.3.1. Segmentación.....	24
3.3.2. Contrastes.....	25
3.3.3. Aplicación de la transformada de Fourier.....	26

4. Resultados

4.1. Adquisición de los termogramas.....	28
4.1.1. Caracterización de las lámparas.....	28

4.1.2. Termografía TRIR.....	31
4.1.3. Termografía Pulsada.....	33
4.2. Estimación del diámetro de las imperfecciones.....	36
4.3. Estimación de la difusividad del PMMA.....	39
4.4. Estimación de la profundidad.....	39
4.4.1. Resultados cualitativos.....	39
4.4.2. Fasegramas obtenidos.....	41
4.4.3. Fase y contraste de fase absoluto.....	42
4.4.4. Protocolo final.....	49

5. Conclusiones y perspectivas

5.1. Conclusiones finales.....	50
5.2. Perspectivas de trabajos futuros.....	51

6. Eventos

6.1. Eventos Nacionales.....	52
6.2. Eventos Internacionales.....	53

7. Referencias y anexos

7.1. Referencias.....	54
7.2. Anexos.....	56
7.2.1. Manual de usuario.....	56
7.2.2. Artículo para publicación.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Número de publicaciones en termografía en los últimos 60 años.....	2
Figura 2.2.1. Espectro Electromagnético.....	8
Figura 3.1.1. Sistema experimental de termografía.....	14
Figura 3.1.2. Probeta de PMMA con imperfecciones controladas.....	15
Figura 3.1.3. Lámparas halógenas de 500 W (Fuentes de excitación térmica).....	16
Figura 3.1.4. Especificaciones de las lámparas halógenas.....	16
Figura 3.1.5. Cámara termográfica Fluke TI300.....	16
Figura 3.1.6. Tarjeta de adquisición de datos NI USB6001.....	19
Figura 3.1.7. Relé de estado sólido Sassin ZG3NC-240B.....	19
Figura 3.1.8. Interfaz de potencia basada en relé para control de las lámparas.....	20
Figura 3.1.9. Interfaz gráfica de usuario para control de duración pulso de calor.....	20
Figura 3.2.1. Principio físico de los modos de adquisición.....	21
Figura 3.2.2. Montaje experimental para la adquisición en modo reflexión.....	22
Figura 3.2.3. Montaje experimental para la adquisición en modo transmisión.....	22
Figura 3.2.4. Montaje con la cámara en posición de probeta (Posición 1).....	23
Figura 3.2.5. Montaje con la cámara en posición normal (Posición 2).....	23
Figura 3.3.1. Resolución espacial en relación con un píxel para conversión de píxeles en unidades de longitud.....	25
Figura 3.3.2. Aplicación de la <i>fft</i> a una secuencia de termogramas.....	26
Figura 3.3.3. Contraste de fase absoluto contra frecuencia.....	27
Figura 4.1.1. Secuencia de imágenes termográficas tomadas en la posición uno para 10 ms.....	29
Figura 4.1.2. Evolución de la temperatura para los diferentes pulsos de calor en la posición 1.....	30
Figura 4.1.3. Evolución de la temperatura para los diferentes pulsos de calor en la posición 2.....	30
Figura 4.1.4. Termograma obtenido en modo reflexión a los 60 s de la aplicación del pulso.....	31
Figura 4.1.5. Termograma obtenido en modo transmisión a los 60 s de la aplicación del pulso.....	31
Figura 4.1.6. Enfriamiento de la muestra de PMMA según los datos tomados en reflexión.....	32

Figura 4.1.7. Enfriamiento de la muestra de PMMA según los datos tomados en transmisión.....	32
Figura 4.1.8. Termograma adquirido a los 9 s de la aplicación del pulso de calor en modo transmisión.....	33
Figura 4.1.9. Termograma adquirido a los 18 s de la aplicación del pulso de calor en modo transmisión.....	33
Figura 4.1.10. Termograma adquirido a los 18 s de la aplicación del pulso de calor en modo reflexión.....	34
Figura 4.1.11. Termograma adquirido a los 27 s de la aplicación del pulso de calor en modo reflexión.....	34
Figura 4.1.12. Evolución de la temperatura del modo transmisión para 120 imágenes.....	35
Figura 4.1.13. Evolución de la temperatura del modo reflexión para 180 imágenes.....	35
Figura 4.2.1. Segmentación de la muestra de la adquisición en reflexión.....	36
Figura 4.2.2. Segmentación de la muestra de la adquisición en transmisión.....	36
Figura 4.2.3. Gráfica de contraste de los datos tomados en reflexión.....	37
Figura 4.2.4. Gráfica de contraste de los datos tomados en transmisión.....	37
Figura 4.4.1. Gráfica de perfiles de temperatura de las secciones (reflexión).....	40
Figura 4.4.2. Gráfica de los perfiles de temperatura de las secciones (transmisión).....	40
Figura 4.4.3. Fasegrama de modo transmisión para una frecuencia de 21,72 mHz.....	41
Figura 4.4.4. Fasegrama de modo transmisión para una frecuencia de 79,64 mHz.....	41
Figura 4.4.5. Fasegrama de modo reflexión para una frecuencia de 18,38 mHz.....	42
Figura 4.4.6. Fasegrama de modo reflexión para una frecuencia de 21,00 mHz.....	42
Figura 4.4.7. Enfriamiento de las imperfecciones para la adquisición en modo reflexión y un número de muestras de 180.....	43
Figura 4.4.8. Enfriamiento de las imperfecciones para la adquisición en modo transmisión y un número de muestras de 120.....	43
Figura 4.4.9. Fase de cada defecto en función de la frecuencia en modo reflexión.....	44
Figura 4.4.10. Fase de cada defecto en función de la frecuencia en modo transmisión.....	44
Figura 4.4.11. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo reflexión.....	45
Figura 4.4.12. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo transmisión.....	45
Figura 4.4.13. Fase filtrada en términos de la frecuencia en modo reflexión.....	46
Figura 4.4.14. Fase filtrada en términos de la frecuencia en modo transmisión.....	46
Figura 4.4.15. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo reflexión luego de que la fase fue filtrada.....	47
Figura 4.4.16. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo transmisión luego de que la fase fue filtrada.....	47



CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La Termografía Infrarroja (TIR) es una técnica de Ensayo No Destructivo (NDT) que obtiene la temperatura de un cuerpo mediante la captación de la radiación infrarroja (IR) que éste emite, y la representa a través de imágenes denominadas termogramas. Es necesario que los termogramas posean diferencias de temperatura entre las distintas zonas del material, por lo cual es importante elegir un método de excitación térmica y análisis de los objetos de estudio, para lo que existen diferentes formas como la termografía Lock-In (LT), la vibrotermografía, radiometría infrarroja resuelta en tiempo (TRIR) y la termografía pulsada (PT); de ésta última se desprende la termografía de fase pulsada (PPT) ^[1]. El uso sin contacto, el tipo de radiación que utiliza y el tiempo de adquisición de las imágenes son grandes ventajas en contraste con otras técnicas como el ultrasonido y los rayos X.

Diferentes sucesos y necesidades han causado que la termografía sea un tipo de ensayo no destructivo muy apetecido por investigadores e industrias, por ejemplo, tras el desastre del transbordador espacial Columbia en su última misión en febrero de 2003, el Comité de Investigación de Accidente del Columbia (CAIB) hizo una serie de recomendaciones a la NASA con la intención de prevenir en el futuro accidentes similares; siendo la termografía la primera recomendación para la caracterización de los materiales del Columbia, definiendo que esta técnica certifica a partir de diferentes métodos la integridad de los materiales. De tal manera que los métodos de ensayos no destructivos no solo juegan un rol fundamental en la caracterización de los materiales sino también en la evaluación de su calidad y comportamiento de estos. Siendo así que en el amplio rango de los diferentes métodos no destructivos, la termografía infrarroja se ha caracterizado por ser una de las técnicas más seguras, precisas y confiables a la hora de realizar ensayos sobre diferentes materiales. Además, de poder repetirse cuantas veces sea necesario sin tener contacto con el material y optimizando el tiempo de verificación.

El Grupo de Investigación en Propiedades Magnéticas y Magnetoópticas de Nuevos Materiales (GIMM), ha realizado recientes estudios, aplicando PT a muestras de poli-metilmecrilato (PMMA o plexiglás) y probetas de Aluminio y Acero. Los procedimientos de excitación térmica y procesamiento de imágenes son fundamentales para el análisis de los resultados obtenidos ^[2], es por esto que se planteó una metodología experimental para el desarrollo de un protocolo de adquisición de las imágenes de la muestra, con el fin de analizar correctamente sus características cualitativas y cuantitativas, mediante la aplicación de las técnicas TRIR y PPT.

Se realizaron los ensayos sobre una probeta de poli-metilmecrilato (PMMA) con imperfecciones controladas, puesto que este es un material que actualmente está reemplazando a otros, debido a características como su dureza, durabilidad, transparencia,

entre otras ^{[3][4]}. La aplicación de PPT requiere de una fuente de excitación térmica, para esto se usarán dos lámparas halógenas de 500W, cuya distribución térmica debe ser caracterizada para determinar su influencia como componente de ruido óptico en los termogramas. El tiempo que fluye la corriente en las lámparas fue controlado a través de una GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) y usando la cámara en los modos reflexión y transmisión, se adquirieron distintos termogramas. El diámetro, fue determinado por los procedimientos de termografía TRIR y posteriormente, se aplicó la transformada de Fourier a los termogramas y se usaron las imágenes de fase resultantes para el cálculo del contraste de fase absoluto para que mediante una relación con algunos valores de frecuencias, poder calcular las profundidades correspondientes a los defectos.

1.1. JUSTIFICACIÓN

En el año 2016 más de 2000 artículos fueron publicados en temas relacionados con la termografía y en lo que va corrido del año 2017 ya van más de 1500 (Figura 1.1), la gran mayoría de ellos desarrollados fuera de Colombia. Esto es un reflejo de que mundialmente es bastante requerido y pertinente hacer investigación en el área de los ensayos no destructivos (END), específicamente en termografía infrarroja y sus técnicas derivadas, y además que es necesario en este país empezar a realizar estudios investigativos sobre ello.

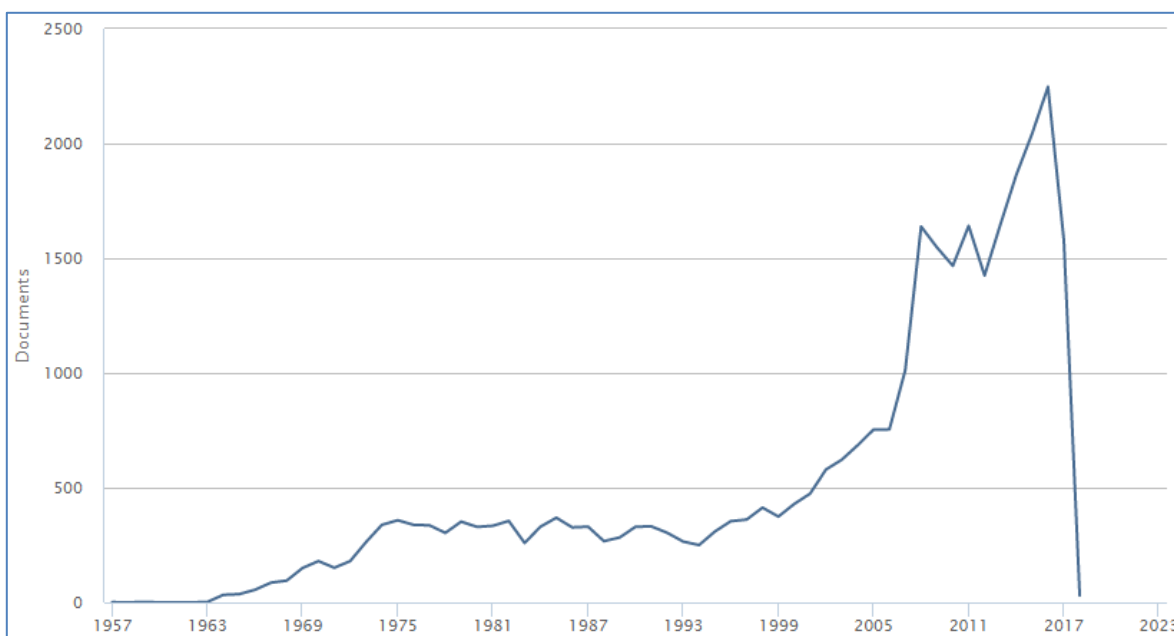


Figura 1.1. Número de publicaciones en termografía en los últimos 60 años.

El uso de la termografía infrarroja es remoto, es decir, no es necesario estar en contacto con un material para que este sea analizado, colocando así esta técnica sobre otras como el ultrasonido. La radiación que se requiere es la ubicada en el rango del infrarrojo y esta no tiene ningún tipo de riesgo para la salud de las personas a diferencia de los rayos X, que pueden llegar a ser bastante perjudiciales para el ser humano.

Los polímeros como el poli- metilmetacrilato son implementados en gran manera en la industria actual, incluyendo la aeronáutica y la aeroespacial, donde son usados para piezas importantes que de tener algún tipo de imperfección podría ser devastador para muchas vidas humanas. En este orden de ideas, se aplican diferentes técnicas para el control de calidad de las distintas partes y así evitar este tipo de inconvenientes y por ser una técnica de END es apropiada para este tipo de aplicaciones.

En general, los materiales en la realidad sufren de un calentamiento no uniforme al ser excitados por una fuente externa de calor, esto es uno de las mayores limitaciones a la hora de aplicar los análisis termográficos y procesamiento de imágenes de este tipo, pero existen técnicas en TIR que disminuyen este efecto, haciendo posible que se obtengan cálculos acertados y útiles en la práctica.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como parte de la solución a problemáticas expresadas en el apartado anterior se hace necesario encontrar cuál sería el protocolo que tenga características de fácil adquisición de imágenes termográficas y que a su vez permita un correcto análisis de las características de la muestra de PMMA, mediante el procesamiento de los termogramas resultantes aplicando el estudio de contrastes absolutos de temperatura y de fase (en el caso de la transformada de Fourier), además de algoritmos de segmentación que provean información que de otro modo no sería posible intuir.

1.3. OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer e implementar un protocolo de calibración que permita detectar y cuantificar imperfecciones superficiales y subsuperficiales controladas en una muestra patrón de poli- metilmetacrilato, mediante la adquisición y procesamiento de imágenes obtenidas a través de PPT (Termografía de Fase Pulsada) con la transformada de Fourier.

Objetivos Específicos

1. Adquirir habilidad en el manejo de la cámara Fluke T300 y revisar los parámetros físicos relacionados a ella.
2. Definir los criterios de diseño de las probetas y del sistema experimental que permitan la aplicación de las técnicas TRIR y PPT al estudio termográfico sobre la muestra de poli- metilmetacrilato.
3. Implementar TRIR en los dos modos de adquisición y calcular el valor del diámetro de las imperfecciones.
4. Caracterizar la distribución térmica de dos lámparas halógenas para determinar su influencia como componente de ruido óptico en las imágenes termográficas.
5. Implementar las técnicas TRIR y PPT para el procesamiento de imágenes termográficas de la probeta de PMMA tanto en modo transmisión como en modo reflexión de la cámara, para evaluar la presencia o ausencia de defectos y su posición, y comparar resultados en ambos modos.
6. Realizar el procesamiento de las imágenes de fase resultantes de la aplicación de la FFT para obtener información de la frecuencia y relacionarla con la profundidad de los defectos, en ambos modos de adquisición.
7. Analizar e implementar un protocolo para la caracterización de imperfecciones superficiales y subsuperficiales en probetas poliméricas.

1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis está dividida en ocho capítulos principales. En el primer capítulo se hace una corta introducción al documento, una justificación de su pertinencia y necesidad, el planteamiento del problema basado en la justificación y la exposición de los objetivos que llevarán a cumplir con la solución de las problemáticas. El capítulo dos muestra la fundamentación teórica necesaria para comprender los principios físicos que rigen los experimentos prácticos de la termografía, es decir, conceptos ayudan a comprender cómo utilizar los elementos de adquisición y a interpretar los resultados obtenidos. El tercer apartado expone la manera en que se realizaron las dos etapas principales de la metodología (adquisición y procesamiento), detallando los componentes y modos de captura del sistema experimental, además de mostrar las técnicas y herramientas de procesamiento en Matlab para la caracterización y cuantificación de las dimensiones correspondientes a las imperfecciones de la muestra de PMMA.

En el capítulo cuatro se pueden observar los resultados de cada etapa de la metodología para el cumplimiento de los objetivos planteados, se ven algunos de los termogramas

obtenidos en TRIR y PT, un pequeño apartado destinado al cálculo de la difusividad del material utilizado y diversas gráficas resultantes luego de los algoritmos de procesamiento de imágenes para la caracterización de las imperfecciones presentes. El capítulo cinco contiene todas las conclusiones referentes a los resultados y en base a los objetivos propuestos inicialmente e incluye también algunas perspectivas sobre posibles trabajos futuros basados en el sistema de adquisición y la manera de procesar los datos. Además, el sexto capítulo es una contextualización sobre los eventos en los cuales se ha participado a lo largo del desarrollo de este trabajo y las publicaciones que han podido surgir del mismo. Finalmente, el último capítulo da cuenta de toda la bibliografía empleada, es decir, las referencias que sustentan cada parte de esta tesis, conjuntamente con algunos anexos que son importantes para la construcción del presente trabajo de grado.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

Dato Histórico

Cerca del año 1800 el astrónomo alemán Sir William Herschel realizaba experimentos con la luz solar. Descubrió entonces la radiación electromagnética haciendo pasar la luz del sol, por un prisma y midiendo la temperatura en cada uno de los colores obtenidos con un termómetro de mercurio sensible. Herschel se dio cuenta de que la temperatura aumentaba a medida que medía más allá del color rojo, en una zona que denominó “calor negro” la cual hoy día se conoce como calor infrarrojo, correspondiente a la región de longitudes de onda del infrarrojo. Más tarde, con los avances desarrollados por Thomas Seebeck (Efecto termoeléctrico), Leopoldo Nobili (Termomultiplicador), Macedonio Melloni (Termopila), Samuel Langley (Bolómetro) y finalmente el hijo de Sir William, Sir John Herschel consiguió la primera imagen infrarroja en 1840, usando un dispositivo denominado evaporígrafo. Las primeras versiones de cámaras termográficas se llamaron detectores fotoconductores, y fueron utilizadas en aplicaciones militares, pero con el pasar del tiempo se implementaron en la industria y fueron mejorando hasta obtener las cámaras termográficas que se conocen en la actualidad.

2.1. Termodinámica Básica

La termodinámica se encarga de estudiar cómo se mueve la energía térmica o calor y de qué manera altera a la materia. Existen varios tipos de energía y es posible convertir unos en otros sin necesidad de pérdidas pero tipos que posiblemente son más difíciles de aprovechar. Es bien conocido, expresándolo con sencillez, que la primera ley de la termodinámica establece que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma; y la segunda ley dice que cuando hay un gradiente de temperatura entre dos objetos, la energía térmica se transfiere de las zonas más calientes a las más frías. El concepto de transferencia de calor es importante ya que implica transferencia de electrones o aumento de las vibraciones atómicas o moleculares, y son estos efectos los que se miden al tomar la temperatura.

La energía térmica se transfiere por tres métodos diferentes: conducción, convección y radiación.

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los electrones libres ^[5].

La difusividad (α) es el coeficiente que representa qué tan bien se difunde o conduce calor un material respecto a su capacidad de almacenarlo, es decir, expresa la velocidad de cambio y flujo de temperaturas en un material hasta que alcanza el equilibrio térmico. El almacenamiento tiene relación con la densidad (ρ) y la capacidad calorífica (k) y el calor específico del material (C_p).

$$\alpha = \frac{\text{Calor conducido}}{\text{Calor almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2.1)$$

Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Un valor pequeño de la difusividad térmica significa que, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido todavía más.

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura.

Finalmente, **la radiación** es la transferencia de energía, como el calor, mediante ondas electromagnéticas (fotones). Dicha energía puede presentarse de varias formas, por ejemplo, como luz visible, ondas de radio y como radiación infrarroja. En los estudios de transferencia de calor es de interés la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Es diferente de las otras formas de radiación, como los rayos x, los rayos gamma, las microondas, las ondas de radio y de televisión, que no están relacionadas con la temperatura. Todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica ^[5].

2.2. Radiación Electromagnética

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases emiten, absorben o transmiten radiación en diversos grados. Sin embargo, la radiación suele considerarse como un fenómeno superficial para los sólidos que son opacos a la radiación térmica, como los metales, la madera y las rocas, ya que las radiaciones emitidas por las regiones interiores de un material de ese tipo nunca pueden llegar a la superficie, y la radiación incidente sobre esos cuerpos suele absorberse en unas cuantas micras hacia adentro de dichos sólidos.

Existen distintos fenómenos como la difracción, la refracción y la interferencia que indican que la luz se comporta como onda de longitud λ y frecuencia ν , relacionadas a través de la ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.2)$$

Donde c es la velocidad de la luz ($c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$).

El efecto fotoeléctrico muestra que la energía está dada por:

$$E = h\nu \quad (2.3)$$

Donde h es la constante de Planck ($h = 6,62 \times 10^{-34} Js$)

De gran importancia es la transmisión de calor mediante ondas electromagnéticas, que es a lo que se denomina radiación térmica y es emitida por la materia en equilibrio termodinámico, para lo cual la energía del fotón está relacionada con la temperatura del material emisor por:

$$T = \frac{E}{k} \quad (2.4)$$

Donde k es la constante de Boltzmann ($k = 1,381 \times 10^{-23} \frac{J}{K}$)

Espectro Electromagnético

El espectro electromagnético se divide en diferentes zonas (Figura 2.2.1), según la longitud de onda de la luz. Aunque hay longitudes de onda que son visibles al ojo humano, las que son correspondientes al calor irradiado, solo son visibles por sistemas termográficos y pertenecen a la región infrarroja del espectro.

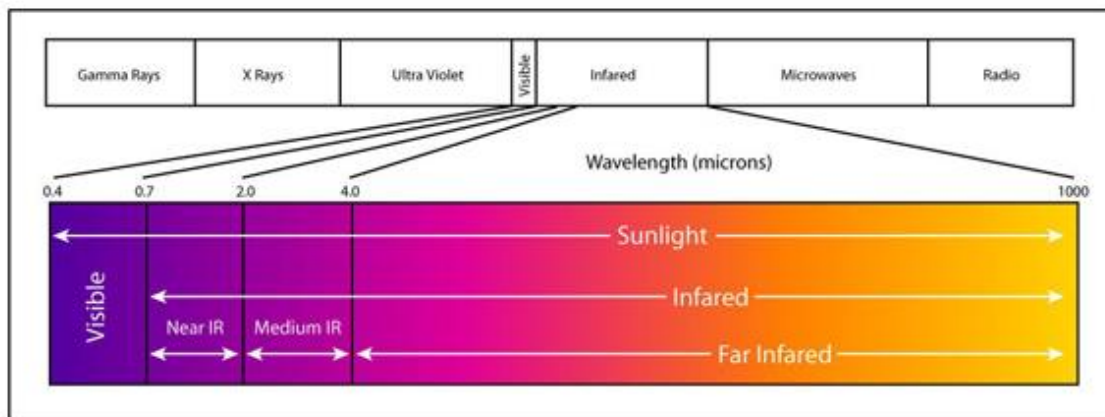


Figura 2.2.1. Espectro Electromagnético.

Con las cámaras infrarrojas se pueden ver los reflejos tanto de los objetos calientes como de los fríos en algunas superficies, por ejemplo, la de los metales brillantes, conocidos como “espejos térmicos” y la radiación infrarroja puede ser absorbida por una superficie, tal como en el caso de una mano próxima a una estufa eléctrica caliente en la cocina. Por otro lado, la cantidad de calor irradiado por una superficie queda determinada por la eficiencia con la que la superficie emite energía. La mayoría de los materiales no metálicos, como superficies pintadas o la piel humana, emiten energía

eficientemente, esto significa que conforme la temperatura aumenta, irradian mucha más energía, como el caso de un quemador de cocina. Otros materiales, como el caso de metales sin pintar o que no están fuertemente oxidados, son menos eficientes a la hora de irradiar energía ^[6].

Existen algunas características importantes de los materiales como es la emisividad, y su conocimiento es esencial para los ensayos termográficos. La emisividad describe la relación existente entre la radiación emitida por un objeto y la radiación emitida por un cuerpo negro y toma valores entre 0 y 1.

2.3. Propagación térmica de una onda

La transferencia de calor es un vector, por tanto posee dirección y magnitud. Además, la razón de la transferencia de calor por conducción en una dirección determinada es proporcional al gradiente de temperatura, que es la razón del cambio de la temperatura con respecto a la distancia en esa dirección. En general, la conducción de calor en un medio es tridimensional y depende del tiempo, y la temperatura en un medio varía con la posición y con el tiempo; es decir, $T=T(x, y, z, t)$ ^[7].

Ecuación unidimensional de la conducción de calor

Si se considera una pared plana grande y se toma un corte de espesor Δx transversal a la superficie, la densidad de la pared es ρ , el calor específico es C_p , la conductividad térmica es k que generalmente varía en pequeñas proporciones cuando cambia la temperatura y si finalmente se considera generación de calor (e_{gen}) al interior de la pared, se tiene que la ecuación unidimensional de calor es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{e_{gen}}{k} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

Como ya se dijo k es variable con la temperatura (y por tanto también depende de x), entonces debe permanecer dentro de la derivada parcial, sin embargo en la mayor parte de las aplicaciones prácticas la variación de la conductividad térmica es tan pequeña, que podría aproximarse a un valor promedio constante, de tal manera que la ecuación queda reducida a:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{e_{gen}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.6)$$

Ahora bien, si no hay generación de calor $e_{gen} = 0$, pero con variaciones de temperatura, se tiene finalmente que:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.7)$$

Como ya se mencionó, la conducción de calor es en realidad un fenómeno tridimensional, si se lleva la ecuación 2.7 a las tres dimensiones, después de un exhaustivo proceso, se tiene que en coordenadas rectangulares la ecuación de conducción de calor es ^[7]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.8)$$

Esta expresión es conocida como la ecuación de difusión.

Cuando un pulso de energía térmica se enfoca sobre la superficie de un material sólido opaco, el material absorberá parte de la energía incidente, esto producirá un flujo de calor localizado en el espécimen, este flujo es gobernado por la ecuación unidimensional de calor (Ecuación 2.7). Si la fuente de energía es modulada, se producirá en el material un flujo de calor periódico, que es un proceso de difusión y produce una distribución periódica de temperatura llamada onda térmica ^[8].

2.4.Transformada de Fourier Discreta

La transformada de Fourier Discreta (DFT del inglés Discrete Fourier Transform).

Sea $x[k]$ una secuencia finita de longitud N , la DFT de $x[k]$, denotada como $X[n]$, se define como:

$$X[n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{-jkn\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (2.9)$$

Cuyo resultado sería:

$$X[n] = Re_n + Im_n \quad (2.10)$$

De donde se pueden obtener dos valores de gran importancia como son la amplitud (Ecuación 2.11) y la fase (Ecuación 2.12), dados por:

$$|X[n]| = \sqrt{Re_n^2 + Im_n^2} \quad (2.11)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{Im_n}{Re_n}\right) \quad (2.12)$$

La DFT inversa estaría dada por:

$$x[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X[n] e^{jkn\left(\frac{2\pi}{N}\right)} \quad (2.13)$$

La DFT tiene algunas características fundamentales como ^[9]:

- Existe una correspondencia uno a uno entre $x[n]$ y $X[k]$.
- La DFT está íntimamente relacionada con la serie y la transformada de Fourier de tiempo discreto, y por ende exhibe algunas de sus propiedades más importantes.
- La DFT es la representación de Fourier más apropiada para realizarse en una computadora digital, ya que es discreta y de longitud finita, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.
- Para su cálculo está disponible un algoritmo extremadamente rápido denominado la Transformada Rápida de Fourier (del inglés Fast Fourier Transform).

2.5. Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja (TI) es una técnica que utiliza la distribución de temperaturas sobre la superficie de una material o dispositivo, con el fin de evaluar el comportamiento o la estructura de lo que pasa bajo ella. Se divide en dos tipos conocidos como: TI pasiva (TIP) y TI activa (TIA).

En la *termografía infrarroja pasiva* el objeto de estudio puede generar calor por sí mismo, es por eso que es muy utilizada en empresas para evaluar procesos industriales de manufactura, es decir, para mantenimiento preventivo y predictivo. Una gran ventaja de esta técnica es que es posible implementarla en tiempo real a una distancia segura de lugares o piezas de que estén a altas temperaturas, por ejemplo mientras una máquina está operando.

A diferencia de la TIP, la *termografía infrarroja activa* requiere de una fuente externa de excitación térmica y es la técnica más adecuada para implementar ensayos en materiales para detectar y cuantificar imperfecciones. Esta técnica cuenta con una variedad de métodos de procesamiento de datos térmicos, los cuales difieren según su principio de funcionamiento.

Existen básicamente cuatro técnicas usadas correspondientes a TIA, que difieren entre si principalmente por la forma como son adquiridos y procesados los datos, estas son: Termografía Lock-In, Termografía por calentamiento mediante escalón de calor, Vibrotermografía y Termografía Pulsada.

Termografía Lock- In (TL)

Se detectan remotamente ondas térmicas generadas dentro de una muestra. La generación de estas ondas térmicas se lleva a cabo aplicando periódicamente calor (por ejemplo una onda seno modulada mediante el calentamiento con lámparas) sobre la superficie de un material mientras que la temperatura oscilante resultante es registrada a través de la radiación térmica infrarroja emitida.

El término Lock-In hace referencia a la necesidad de registrar la dependencia exacta en el tiempo entre la señal en la salida y la señal de referencia en la entrada, esto indica calentamiento modulado. Esto se efectúa con un amplificador Lock-In en un calentamiento punto por punto mediante laser o por computador mediante calentamiento por lámparas de tal manera que se generan imágenes de fase y magnitud. Las imágenes de fase están relacionadas con el tiempo de propagación y son de interés en el ensayo termográfico no destructivo (ETND) ya que son relativamente insensibles a las propiedades ópticas de la superficie como el calentamiento no uniforme. El rango de profundidad es inversamente proporcional a la frecuencia de modulación de tal manera que las altas frecuencias de modulación restringen el análisis a defectos cercanos a la superficie ^{[10] [11]}.

Termografía por calentamiento mediante escalón de calor

Esta técnica es también conocida como TRIR (del inglés time-resolved infrared radiometry). El término time-resolved se refiere a que la temperatura es muestreada durante y después del calentamiento. En este caso la temperatura es monitoreada durante la aplicación de un pulso escalón de calor que puede durar varios segundos o minutos dependiendo del grosor y del material de la muestra que se va a inspeccionar. El principal uso de la termografía TRIR es la evaluación de estructuras hechas con materiales compuestos, aunque también se utiliza para el análisis de capas y multicapas de pintura ^{[12][13]}.

Vibrotermografía

En la vibrotermografía se excita externamente la muestra mediante energía mecánica oscilante, es decir, vibraciones mecánicas, las cuales están en un rango de 0 a 25 kHz. Al interior del espécimen se presenta fricción en las zonas defectuosas, tales como fisuras y delaminaciones, esto genera diferencias de temperatura entre zonas del material, y así se revelan las imperfecciones. . Por lo tanto si se cambia la frecuencia de excitación mecánica hace que aparezcan o desaparezcan gradientes térmicos locales ^[14].

Termografía Pulsada (TP)

La Termografía Pulsada es una de las técnicas más comunes de estimulación térmica en TIA, ya que la rapidez de inspección en la que un pulso corto de estimulación térmica que dura unos cuantos milisegundos para materiales de alta conductividad (como Aluminio) y varios segundos para aquellos de baja conductividad (como plástico y grafito epóxico), es aplicado sobre la muestra para producir diferenciales de temperatura. Esta técnica implica el uso de un pulso de calor y el registro del descenso de temperatura sobre la muestra. Si se compara esta técnica con TRIR se observa que

la TP no registra la evolución de temperatura durante el calentamiento sino solo durante el enfriamiento ^[14].

En el uso de la TP hay una amplia variedad de técnicas de procesamiento que permiten la detección y caracterización de imperfecciones en materiales, tales como: termografía de componentes principales, detección y caracterización de defectos con redes neuronales artificiales, máquinas de soporte vectorial, máquinas de soporte vectorial para casos linealmente separables, máquinas de soporte vectorial no lineales y kernels, funciones kernel, detección y caracterización de defectos con wavelets, contrastes térmicos, reconstrucción de señales termográficas y termografía de fase pulsada.

La termografía de fase pulsada está basada en el procesamiento con la transformada de Fourier, a las imágenes obtenidas directamente de TP, se hace explícito este procedimiento en el apartado 3.3.3.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. Descripción de los elementos del sistema

El sistema de adquisición de los termogramas cuenta con cinco componentes principales que cumplen determinadas funciones y se muestra en la figura 3.1.1.

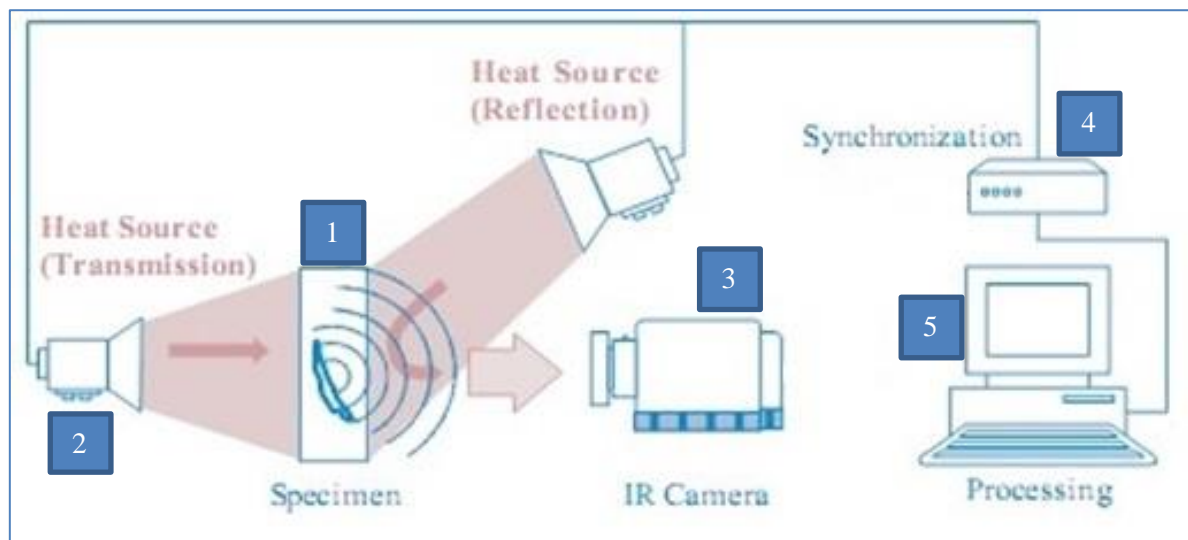


Figura 3.1.1. Sistema experimental de termografía.

Los componentes necesarios para los ensayos termográficos son los expresados a continuación, al igual que las imágenes de aquellos usados en la práctica.

1) Muestra de Poli- metilmetacrilato (PMMA o plexiglás) ^[17]

Diseñada en el laboratorio de mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Probeta circular con diámetro 120 mm y espesor 5 mm, cuenta con 16 imperfecciones circulares de diámetro 10 mm y profundidades que van desde 0,2 mm hasta 1,7 mm en pasos de 0,1 mm, el esquema es el siguiente:

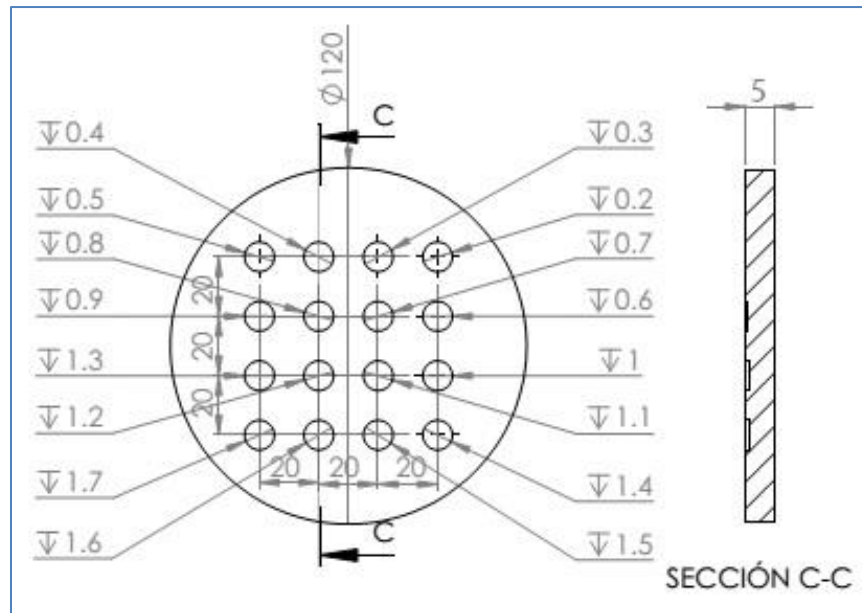


Figura 3.1.2. Probeta de PMMA con imperfecciones controladas.

El PMMA es transparente y por consiguiente su emisividad es baja y podría generar ruido óptico en las imágenes a causa de brillos indeseados. Por tanto, la probeta fue pintada con pintura en aerosol color negro mate para aumentar este valor y hacer más efectiva la adquisición. Cabe mencionar que es pintura fácilmente removible con agua y es por esto que sigue siendo un tipo de ensayo no destructivo.

A esta muestra se le aplicarán los procesos de termografía para la cuantificación de las dimensiones (diámetro y profundidad) de sus imperfecciones. Es esencial tener en cuenta que para la mayor parte del procesamiento se realizó una división de la probeta en cuatro secciones, siendo la primera la de las imperfecciones menos profundas (superior) y la cuarta aquella de las más profundas. Se numeraron los defectos del 1 al 16, donde el primero es el de 0,2 mm y el último es el de 1,7 mm. Además este diseño del espécimen permite ver hasta qué punto o variación es posible cuantificar la profundidad, puesto que la diferencia entre una imperfección y su vecina es de 0,1 mm, a diferencia de otros ensayos realizados por A. Ramírez donde las variaciones son de 0,5 mm.

2) Excitación: Lámparas halógenas

Dos lámparas halógenas de 500 W y de longitud de onda cercana a los 600 nm, con el fin de excitar la muestra de PMMA y generar en ella diferencias de temperatura entre zonas defectuosas y zonas no defectuosas. La estructura que sostiene las lámparas es la de la figura 3.1.3 y fueron directamente apuntadas hacia la probeta.

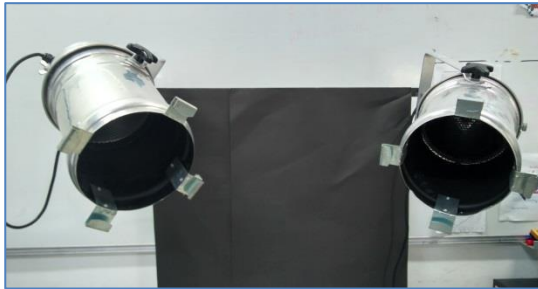


Figura 3.1.3. Lámparas halógenas de 500 W (Fuentes de excitación térmica).



Figura 3.1.4. Especificaciones de las lámparas halógenas.

3) Adquisición: Cámara Termográfica Fluke TI 300

Con la cámara termográfica se adquirieron los distintos termogramas, haciendo uso de las diferentes funciones como la captura automática cada cierto intervalo de tiempo, el ajuste de la emisividad y del segundo plano (temperatura ambiente). La siguiente tabla muestra las especificaciones detalladas de la cámara y la figura 3.1.5 es la cámara utilizada.



Figura 3.1.5. Cámara termográfica Fluke TI300.

Especificaciones detalladas	
Temperatura	
Rango de medida de temperatura (no calibrada por debajo de -10 °C)	-20 °C a +650 °C (-4 °F a +1.202 °F)
Precisión de medida de temperatura	± 2 °C o 2 % (a 25 °C nominales, la mayor de ambas)
Corrección de emisividad en pantalla	Sí (por número y tabla)

Compensación de la temperatura reflejada de fondo en pantalla	Sí
Corrección de transmitancia en pantalla	Sí
Rendimiento de formación de imágenes	
Frecuencia de captura de imágenes	Velocidad de actualización de 9 Hz
Tipo de detector	Matriz de plano focal, microbolómetro no refrigerado, 240 x 180 píxeles
Sensibilidad térmica (NETD)	$\leq 0,05$ °C a 30 °C temp. objetivo (50 mK)
Número total de píxeles	43,200
Banda espectral infrarroja	7,5 μ m a 14 μ m (onda larga)
Cámara de luz visible	Rendimiento industrial de 5,0 megapíxeles
Tipo de lente estándar para infrarrojos	
Campo de visión	24 ° x 17 °
Resolución espacial (IFOV)	1,75 mrad
Distancia focal mínima	15 cm (aprox. 6 pulg.)
Lente opcional tipo teleobjetivo para infrarrojo	
Campo de visión	12 ° x 9 °
Resolución espacial (IFOV)	0,87 mrad
Distancia focal mínima	45 cm (aprox. 18 pulg.)
Lente opcional tipo gran angular para infrarrojo	
Campo de visión	46 ° x 34 °
Resolución espacial (IFOV)	3,49 mrad
Distancia focal mínima	15 cm (aprox. 6 pulg.)
Mecanismo de enfoque	
Sistema autofocus LaserSharp™	Sí
Enfoque manual avanzado	Sí
Presentación de la imagen	
Paletas	
Estándar	Hierro, azul-rojo, alto contraste, ámbar, ámbar invertido, metal caliente, escala de grises, escala de grises invertida
Ultra Contrast™	Hierro ultra, azul-rojo ultra, alto contraste ultra, ámbar ultra, ámbar invertido ultra, metal caliente ultra, escala de grises ultra, escala de grises invertida ultra
Nivel y rango	Ajuste automático y ajuste manual del nivel y del rango
Cambio automático rápido entre el modo manual y el automático	Sí

Reajuste rápido y automático de la amplitud en modo manual	Sí
Rango mínimo (en modo manual)	2,0 °C (3,6 °F)
Rango mínimo (en modo automático)	3,0 °C (5,4 °F)
Información sobre IR-Fusion®	
Recuadro (PIP)	Sí
Pantalla totalmente Infrarroja	Sí
Modo AutoBlend™	Sí
Alarmas de color (alarmas de temperatura)	Alta temperatura, baja temperatura e isoterma (seleccionable por el usuario)
Captura de imágenes y almacenamiento de datos	
Mecanismo de captura, revisión y almacenamiento de imágenes	Captura, revisión y almacenamiento de imágenes con una sola mano
Medio de almacenamiento	Tarjeta de memoria micro SD, memoria flash interna, conector USB para almacenamiento en memoria USB externa. Descarga directa por medio de conexión USB a ordenador
Formatos del archivo	No radiométricos (.bmp) o (.jpeg) o completamente radiométricos (.is2) No se requiere software de análisis para los archivos no radiométricos (.bmp y .jpg)
Formatos de archivos exportables con el software SmartView®	BMP, DIB, GIF, JPE, JFIF, JPEG, JPG, PNG, TIF y TIFF
Revisión de la memoria	Vista de imágenes en miniatura para desplazarse y seleccionar la imagen deseada
Otras características de productividad y ahorro de tiempo	
Anotaciones de voz	Hasta 60 segundos de tiempo de grabación por imagen; reproducción de sonido en la propia cámara
IR-PhotoNotes™	Sí
Conectividad Wi-Fi	Sí, a PC, iPhone®, iPad®, WiFi y LAN*
Grabación de video*	Estándar y radiométrica
Transmisión de vídeo	Vía USB a PC y vía HDMI a una pantalla compatible HDMI
Compatibilidad con Fluke Connect®	Sí
Captura automática (temperatura e intervalo)*	Sí
Control y funcionamiento remoto (para aplicaciones especiales y avanzadas)	No
Especificaciones generales	
Temperatura de trabajo	De -10 °C a +50 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C a +50 °C (-4 °F a 122 °F) sin baterías

Humedad relativa	10% a 95% sin condensación
Pantalla táctil resistente (capacitiva)	8,9 cm (3,5 pulg.) diagonal, a color VGA (640 x 480) con retroiluminación

Tabla 1. Especificaciones de talladas de la cámara termográfica.

4) Sincronización

La sincronización está diseñada con el fin de controlar el tiempo que la muestra de PMMA será excitada, lo cual se hace mediante un relé de estado sólido (Figura 3.1.7) directamente conectado a las lámparas, una tarjeta de adquisición de datos NI USB 6001 (Figura 3.1.6) y una interfaz gráfica de usuario (GUI, figura 3.1.9) diseñada en Matlab que muestre una cuenta regresiva antes de permitir el pulso de calor y en la que se pueda determinar su duración.



Figura 3.1.6. Tarjeta de adquisición de datos NI USB6001.



Figura 3.1.7. Relé de estado sólido Sassin ZG3NC-240B.



Figura 3.1.8. Interfaz de potencia basada en relé para control de las lámparas

Tiempo Cuenta Regresiva (s)		Cuenta Regresiva	
1		1	
Duración del Pulso (ms)			
500			
Iniciar			

Figura 3.1.9. Interfaz gráfica de usuario para control de duración pulso de calor.

Es importante mencionar que la cámara Fluke TI 300 no provee la posibilidad de ser manipulada desde el computador, de ahí que el primer disparo tuvo que ser hecho manualmente pero luego de esto la cámara misma captura automáticamente los termogramas con el espacio de tiempo determinado por el usuario. En el caso correspondiente a este trabajo fue cada 3 s para PPT y cada 30 s para TRIR.

5) Procesamiento

El último elemento es un computador con Matlab para el debido procesamiento de los termogramas y así la cuantificación de las imperfecciones.

3.2. Montaje Experimental

3.2.1. Modo Reflexión y Transmisión

Existen dos modos o maneras de adquirir los termogramas y cada uno está provisto de ciertas ventajas y desventajas en comparación con el otro, uno es el modo de captura en reflexión y el otro es captura en transmisión. La figura 3.2.1 muestra brevemente el principio físico de cada modo de adquisición, y más adelante se explica detalladamente en qué consisten y de qué manera se deben ubicar los componentes principales (cámara termográfica, lámparas y probeta de PMMA).

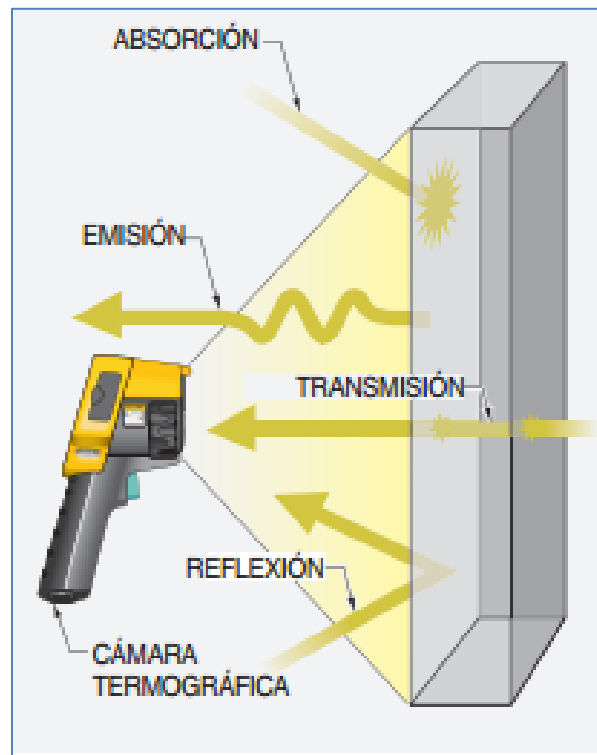


Figura 3.2.1. Principios físicos de los modos de adquisición.

El rayo amarillo representa el pulso de excitación térmica que impacta directamente sobre la probeta de PMMA, esta absorbe parte de la energía que la irradia y es esta energía absorbida la que permite que haya diferencias de contraste entre las distintas zonas del material y que, de esta forma se detecten las imperfecciones para posteriormente cuantificarlas.

Ahora bien, en el modo reflexión la cámara se encuentra ubicada del mismo lado que las dos lámparas halógenas como lo muestran la figura 3.2.2, así la energía que impacta sobre la superficie de la probeta es instantáneamente adquirida por la cámara.

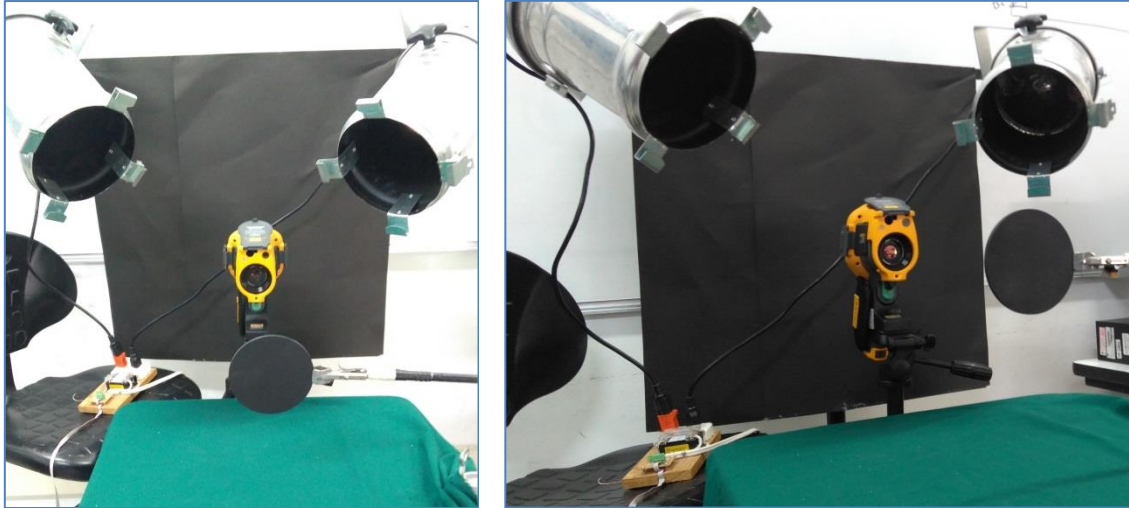


Figura 3.2.2. Montaje experimental para la adquisición en modo reflexión.

El modo transmisión requiere que la cámara esté del lado opuesto a la fuente de calor, es por esto que la luz golpea una cara de la muestra y la cámara adquiere la radiación infrarroja emitida en la otra cara, siendo en realidad los termogramas un reflejo de la onda térmica difundiéndose por todo el espesor del PMMA, este modo se puede apreciar en la figura 3.2.3.

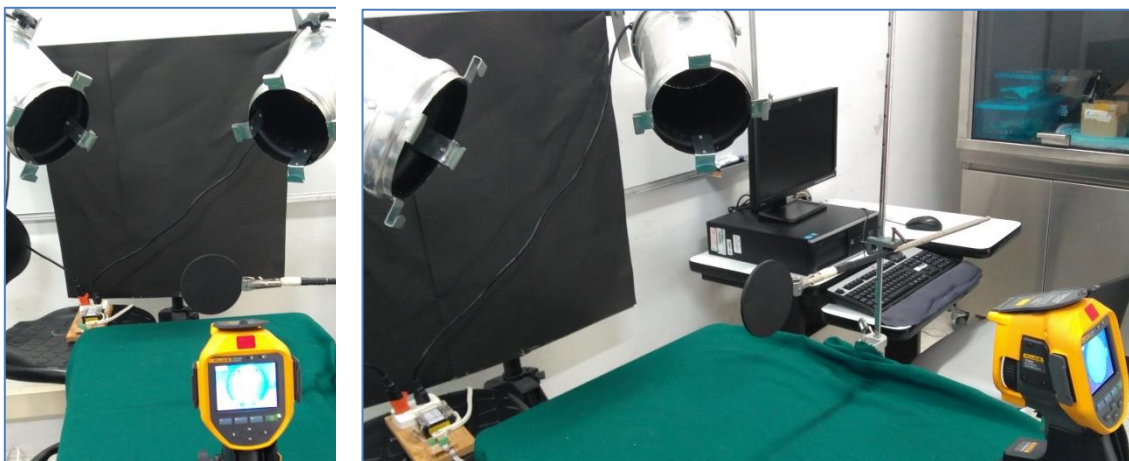


Figura 3.2.3. Montaje experimental para la adquisición en modo transmisión.

En estas configuraciones del sistema de adquisición se aplicaron dos técnicas termográficas, la radiometría infrarroja resuelta en tiempo (TRIR) y la termografía pulsada (PT) que cuya forma de procesar los datos la lleva a ser de fase pulsada (PPT) ^[17]. Para TRIR se aplicó un pulso de 60 s, se tomaron las imágenes cada 30 s durante 22,5 minutos en ambos modos de adquisición y se realizaron comparaciones entre los resultados de ellos, y para PT se excitó con uno de 500 ms, y cada 3 s se adquirieron los termogramas (es decir, una frecuencia de muestreo de 0.33 Hz) durante 6 minutos en modo transmisión; en el otro modo se utilizó un pulso del mismo valor y se tomaron 180 imágenes con la misma frecuencia de muestreo, con el fin de realizar comparaciones con las frecuencias de muestreo y número de termogramas adquiridos por X. Maldague ^[16] y A. Ramírez ^[18], los cuales proponen frecuencias de muestreo de 0,28 Hz y 0,563 Hz, respectivamente.

Es importante tener en cuenta que se implementaron ambos modos de adquisición con la característica de que el espécimen siempre conservaba las imperfecciones del lado opuesto al lente de la cámara, con el fin de que se tuvieran en cuenta como defectos subsuperficiales, y se cuantificaran sus profundidades. Además el experimento de 120 imágenes, una cada 3 s, es útil para la implementación de la norma ASTM E1461-13 para el cálculo de la difusividad ^[15], por lo tanto también se usaron los datos obtenidos con este fin.

3.2.2. Caracterización de las lámparas

Se analizó la influencia que tenían las lámparas como componente de ruido óptico en las imágenes, aplicando pulsos de 10 ms, 30 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms y 500 ms, con la cámara en dos posiciones y tomando 25 imágenes, la posición 1 es la ubicación de la cámara en modo transmisión pero sin probeta (Figura 3.2.4) y la posición 2 es tal que la cámara reemplaza la muestra (Figura 3.2.5), es decir que la luz impactó directamente a la cámara, con el fin de analizar los cambios que las lámparas generaban en el ambiente y determinar si podría llegar a ser ruido en las imágenes.

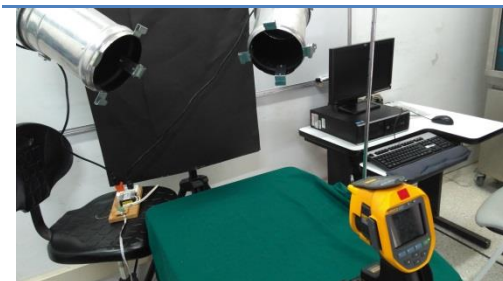


Figura 3.2.4. Montaje con la cámara en posición de probeta (Posición 1).



Figura 3.2.5. Montaje con la cámara en posición normal (Posición 2).

3.3. Procesamiento de imágenes

Teniendo en cuenta que gran parte del éxito en la aplicación de termografía tiene relación con el procesamiento de imágenes, se implementaron dos métodos para el cálculo de los diámetros de las imperfecciones y otro para la aproximación y calibración de la profundidad en términos de la frecuencia. Los diámetros se determinaron mediante segmentación y cálculo de contrastes de temperatura en los termogramas adquiridos por TRIR, mientras que la información de la profundidad fue de dos tipos, cualitativa y cuantitativa. Las características cualitativas fueron dadas por los contrastes en TRIR, y los valores numéricos de las profundidades fueron determinados por PPT, y de allí la curva de calibración: Profundidad contra Frecuencia ciega. Todo lo anterior implementado en uno de los lenguajes de programación de alto nivel más usados en la actualidad, Matlab.

Es importante tener en cuenta que la cámara termográfica Fluke TI 300 cuenta con un software de análisis de datos llamado SmartView, en el cual se pueden desarrollar diferentes actividades que van desde operaciones sencillas como cambiar entre grados Fahrenheit, Celsius y Kelvin, o analizar perfiles del comportamiento térmico en zonas de una imagen termográfica hasta guardar los termogramas en distintos formatos como JPEG, BMP, PNG o inclusive como un documento de texto que guarda una matriz con el valor de temperatura de cada píxel de la imagen, y es este tipo de archivo txt el que fue utilizado en casi todo el procesamiento de las imágenes, ya que las otras extensiones, debido a su naturaleza, modificaban los valores de temperatura contenidos en la matriz radiométrica y los dejaba como valores RGB, perdiendo de esta manera información vital térmica y de su evolución en el tiempo.

3.3.1. Segmentación

La segmentación fue realizada haciendo uso de diferentes funciones y operaciones de Matlab pero únicamente sobre las imágenes TRIR, en ambos modos de adquisición. Inicialmente se realizó un filtrado (**Canny**) para suavizar la imagen y quitar la mayor cantidad de ruido posible, luego se delimitó la imagen a un rectángulo más pequeño en el cual estuvieran contenidas todas las imperfecciones detectadas con el fin de eliminar posibles objetos que pudiesen hacer más complicado el desarrollo de este proceso. Posteriormente se binarizó la imagen, se detectaron y rellenaron los bordes, haciendo posible la obtención de mejores resultados en el siguiente paso, que fue la aplicación de la función **regionprops** de Matlab, la cual entrega diferentes características de cada objeto que encuentra en la imagen. Dos de estas son esenciales para la detección y cuantificación de las imperfecciones, el número de etiquetas y la conocida como **BoundingBox**, ya que la primera daría cuenta de cuántos defectos hay presentes y la segunda de sus valores de ancho y alto en píxeles, que serían equivalentes a los valores de diámetro.

La resolución espacial de la cámara es un valor en mrad que ayuda a relacionar el número de píxeles con su equivalencia en milímetros, mediante la siguiente figura y relación:

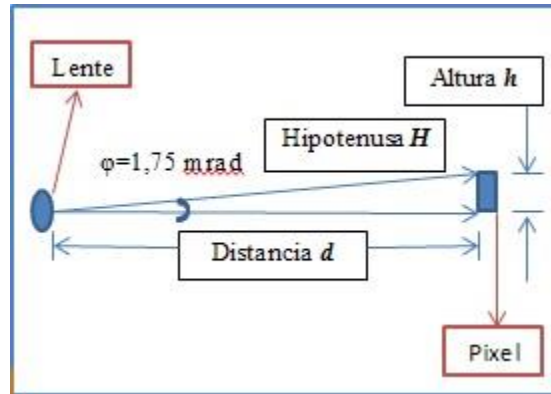


Figura 3.3.1. Resolución espacial en relación con un píxel para conversión de píxeles en unidades de longitud.

De la figura, es posible deducir lo siguiente:

$$\text{sen} \phi = \frac{h}{H} \quad (3.1)$$

Como $\phi \ll$, entonces $d \cong H$ y $\text{sen} \phi \cong \phi$. Así que:

$$\phi = \frac{h}{d} \quad (3.2)$$

$$h = d\phi \quad (3.3)$$

De tal manera que al multiplicar la distancia de la cámara a la muestra de PMMA por la resolución espacial, se obtiene la equivalencia de un píxel en unidades de longitud.

3.3.2. Contrastes

En el desarrollo de este trabajo de grado se realizó el cálculo de dos tipos de contraste, uno para los ensayos TRIR y otro para los PPT. El contraste de temperatura absoluto (ϕ_t) y el contraste de fase absoluto, este último luego de la aplicación de la transformada de Fourier, por lo cual se profundizará sobre ello en el siguiente apartado. Ahora bien, el primer tipo de contraste mencionado es una sustracción simple del valor de temperatura de una zona defectuosa (T_d) menos el de una zona sana (T_{nd}) (Ecuación 3.4), y es ideal que sea cercana al defecto para evitar el efecto del calentamiento no uniforme a lo largo de la superficie de la probeta de PMMA.

$$\Delta T = |T_d - T_{nd}| \quad (3.4)$$

Se utilizó esta operación sobre una imagen determinada en la cual se evidenciaran la mayor cantidad de imperfecciones y se graficaron los valores de contraste sobre la línea central de cada sección de imperfecciones. La gráfica responde a la necesidad del cálculo de diámetros, puesto que en el pixel donde hay un valor pico quiere decir que hubo un cambio de zona sana a imperfecta o viceversa, es decir, el número de pixeles entre dos picos que indiquen cambio de zona, serán equivalentes al diámetro y haciendo uso de la ecuación 3.3 multiplicada por este valor de pixeles se obtiene el valor de diámetro en milímetros.

3.3.3. Aplicación de la transformada de Fourier

Una de las operaciones más importantes a la hora de implementar PPT es la aplicación de la transformada de Fourier, ya que de ella se obtienen los fasegramas, indispensables para la cuantificación de las distintas profundidades presentes en las probetas. En Matlab está ya implementado el algoritmo de la transformada rápida de Fourier, el cual surgió como respuesta a la necesidad de utilizar la DFT. El comando *fft* fue entonces aplicado a cada pixel de la secuencia de imágenes, es decir, si se toma el que se encuentra en la posición $[i, j]$ de la primer imagen adquirida, es ese mismo pixel (T_{ij}) en todas las imágenes con sus respectivos datos, lo que conforma una señal de la evolución de la temperatura en el tiempo, es decir, un perfil de temperatura, este proceso se puede ver claramente en la figura 3.3.2 ^{[16] [17]}.

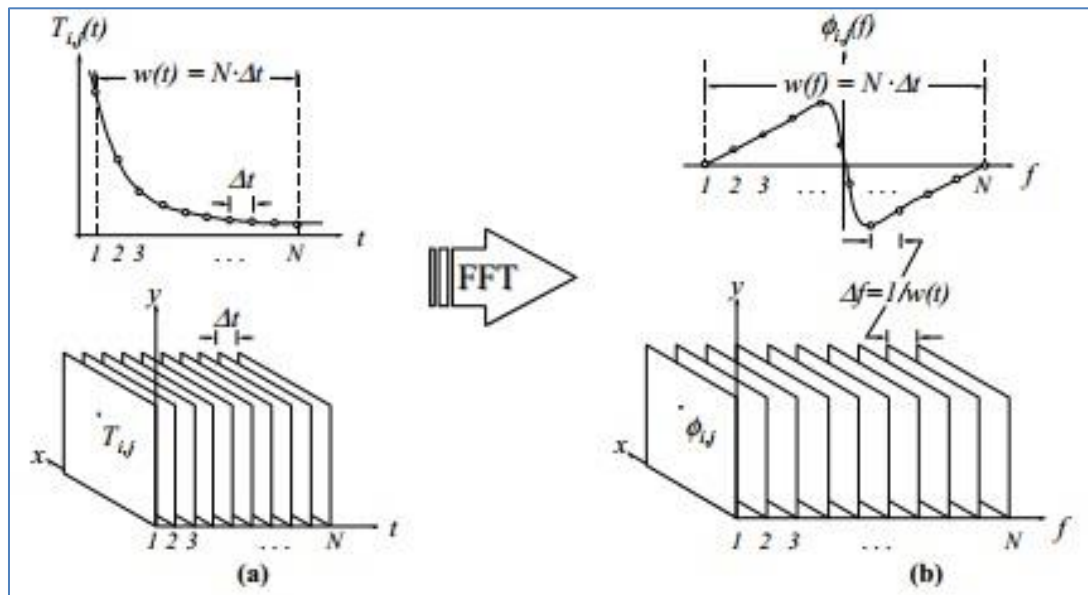


Figura 3.3.2. Aplicación de la *fft* a una secuencia de termogramas ^[16].

Es este conjunto de datos el que fue sometido a la *fft* y posteriormente se tomaron los valores de fase dados por cada señal transformada para la construcción de los

fasegramas y de allí el cálculo del contraste de fase absoluto ($\Delta\phi$), que es la diferencia entre la fase de una zona defectuosa (ϕ_d) y un promedio de fase en una zona sana (ϕ_{nd}) (Ecuación 3.5), idealmente cercana a la imperfección.

$$\Delta\phi = |\phi_d - \phi_{nd}| \quad (3.5)$$

Ahora bien, teniendo los vectores $\Delta\phi$ de cada imperfección y el vector de frecuencias obtenido según la relación de la figura 3.3.2, se construyó una aproximación a la siguiente gráfica teórica:

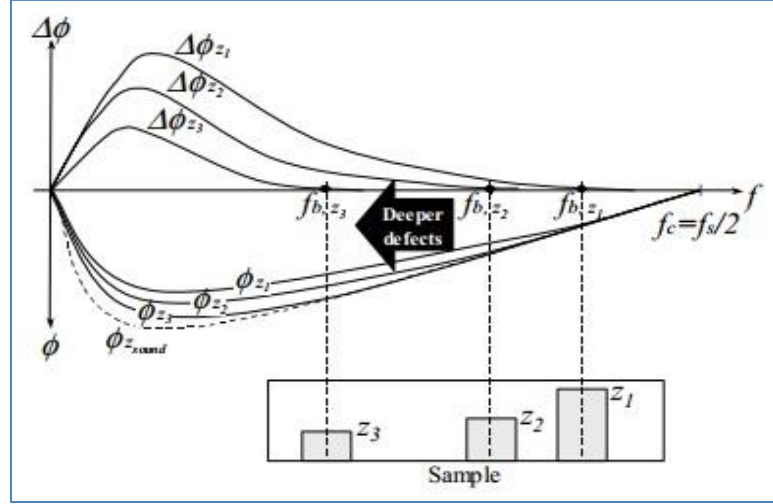


Figura 3.3.3. Contraste de fase absoluto contra frecuencia.

Donde $\Delta\phi_{z_1}$, $\Delta\phi_{z_2}$ y $\Delta\phi_{z_3}$ son los contrastes de fase absoluto para tres imperfecciones con profundidad z_1 , z_2 y z_3 y estos valores se obtienen tomando el valor de la frecuencia ciega f_b obtenido de la gráfica de $\Delta\phi$ en función de f , y según Montanini ^[17], relacionándolo con la difusividad del material a través de la ecuación:

$$z = 1.8\mu = 1.8 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f_b}} \quad (3.6)$$

Donde μ es la longitud de penetración térmica, α es la difusividad térmica del material y se calcula haciendo uso de la norma internacional ASTM E12461-13, que en resumidas cuentas expresa que α se calcula mediante la expresión:

$$\alpha = 0.13879 \frac{L^2}{t_{1/2}} \quad (3.7)$$

L es el valor del espesor del espécimen de PMMA y $t_{1/2}$ es el tiempo en el cual se ubica el valor de máxima temperatura dividido por dos.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

4.1. Adquisición de los Termogramas

Se adquirieron distintos termogramas, algunos sin probeta como en la caracterización de las lámparas, otros con probeta como en TRIR y PT, pero excitados con pulsos de calor de diferentes tiempos de duración. A continuación se muestran algunos termogramas para cada experimento, ya sea en transmisión o reflexión.

4.1.1. Caracterización de las lámparas

La secuencia de la figura 4.1.1 corresponde a cuatro imágenes obtenidas para una duración de pulso de 10 ms en la posición 2, donde el primer termograma fue adquirido antes del pulso y los demás justo después de él. En los marcadores presentes que detallan el valor de temperatura en un pixel determinado, se puede apreciar que el cambio de temperatura entre antes y después del pulso es muy pequeño, además el rectángulo de borde blanco existente en cada termograma muestra el promedio de temperatura en la zona interna a él, y es evidente que la variación es mínima.

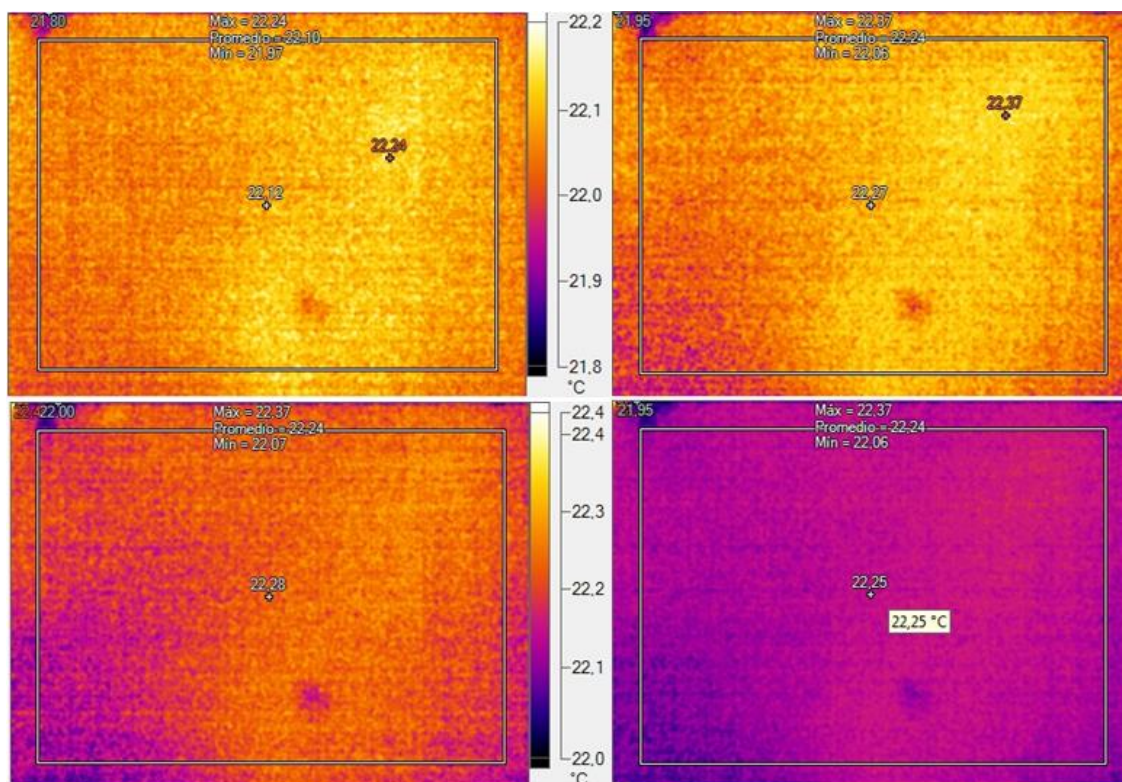


Figura 4.1.1. Secuencia de imágenes termográficas tomadas en la posición uno para 10 ms.

Como se especificó anteriormente en la sección 3.2.2, se tomaron imágenes cada 3 s para seis diferentes tiempos de duración de los pulsos (10 ms, 30 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms y 500 ms) para un total de 25 termogramas por cada uno, con el fin de determinar si el tiempo que estuvieran encendidas las lámparas influiría de alguna manera en las imágenes térmicas, y si sería necesario buscar la manera de corregir dicho efecto. La evolución de la temperatura en el tiempo, para cada duración de los pulsos se puede apreciar en las figuras 4.1.2 y 4.1.3, que evidencian un comportamiento constante en términos prácticos.

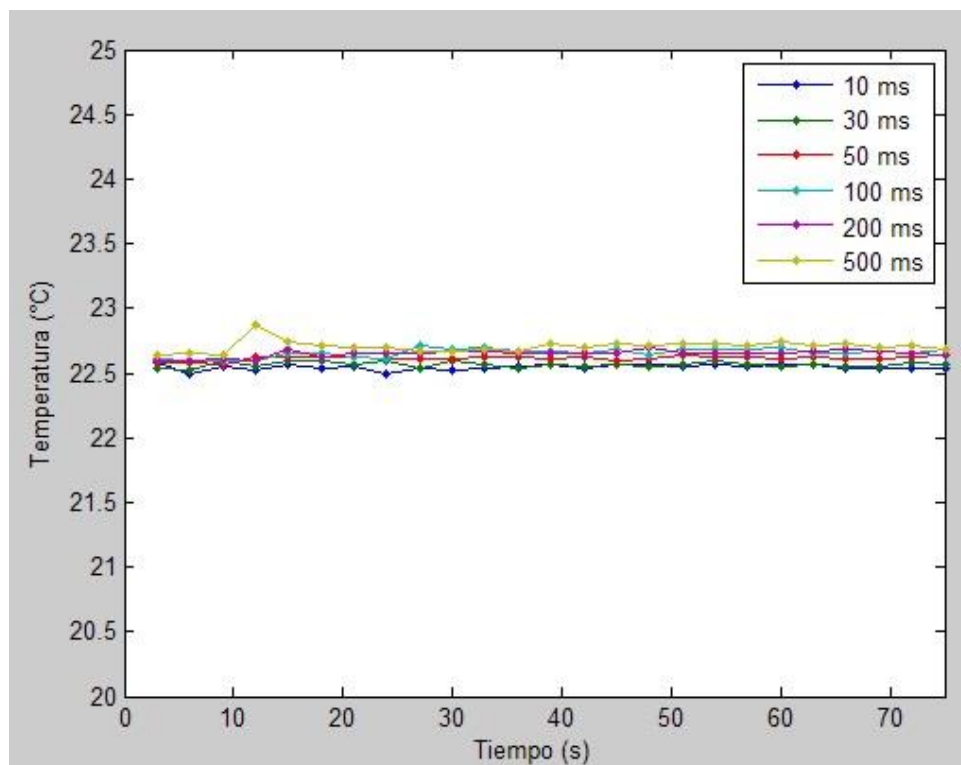


Figura 4.1.2. Evolución de la temperatura para los diferentes pulsos de calor en la posición 1.

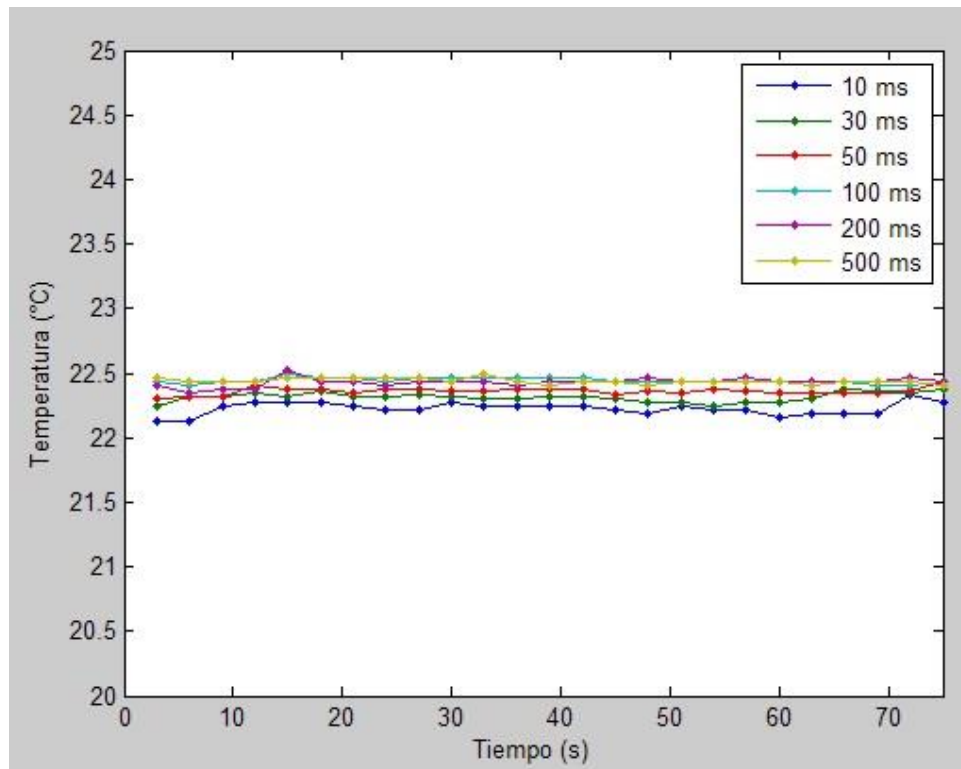


Figura 4.1.3. Evolución de la temperatura para los diferentes pulsos de calor en la posición 2.

En ambas gráficas se aprecia un comportamiento que se puede considerar constante para cada duración de los pulsos de calor, sin embargo podría surgir una pregunta sobre los aumentos entre las distintas curvas de ambas posiciones, ya que la curva de 10 ms es cercana a los 22.5 °C en la posición 1 y a los 22 °C en la segunda posición, pero hay un aumento progresivo hasta que las curva correspondientes a 500 ms son casi de 23 °C y 22.5°C en relación a cada posición.

El hecho es que como no se realizó esta prueba sobre una muestra sino sobre el ambiente expuesto a la excitación de calor, la temperatura ambiente jugaba un papel ineludible, por ejemplo, en el desarrollo del experimento en la posición 2, hubieron aumentos de 0.1 °C en la temperatura ambiente entre cada dos pulsos, es decir, para los pulsos de 10 y 30 ms la temperatura ambiente fue de 22.2 °C, para los dos siguientes de 22.3 °C y para los últimos de 22.4 °C, lo cual explica la cuestión anterior.

Entonces puede afirmarse que la participación de las lámparas como componente de ruido óptico y/o térmico en los termogramas es nula en términos prácticos, de tal manera que no es necesario buscar ningún tipo de corrección a la influencia de las lámparas.

4.1.2. Termografía TRIR

Los ensayos de termografía TRIR o radiometría infrarroja resuelta en tiempo en ambos modos de adquisición de la cámara, dieron como resultado las imágenes de las figuras 4.1.4 y 4.1.5. Donde la primera figura representa un termograma del modo reflexión y la segunda uno del modo transmisión.

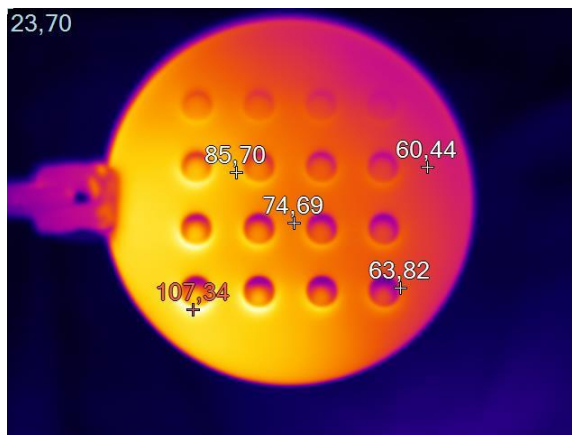


Figura 4.1.4. Termograma obtenido en modo reflexión a los 60 s de la aplicación del pulso.

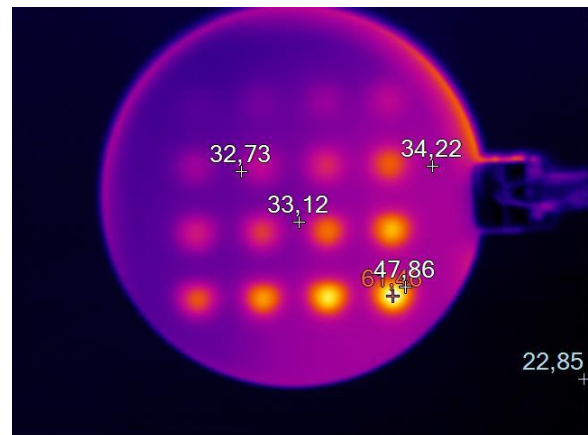


Figura 4.1.5. Termograma obtenido en modo transmisión a los 60 s de la aplicación del pulso.

Es evidente que los termogramas obtenidos en modo reflexión permiten ver con mayor claridad cada una de las imperfecciones, mientras que en modo transmisión son visibles pero difusas. Además, al observar los marcadores de temperatura ubicados en diferentes partes sobre la muestra, es notorio que el termograma de reflexión posee temperaturas de aproximadamente el doble del de transmisión, esto se justifica en que el primer modo capta la energía que impacta directamente sobre una cara de la probeta, sin dar mucho tiempo para que hayan pérdidas de calor en el intercambio con el medio ambiente, mientras que el segundo modo toma la temperatura después de que el pulso de calor impactó sobre una cara, y se difundió a lo largo del espesor de la muestra de PMMA, permitiendo así que existan pérdidas de calor a medida que pase el tiempo.

Teniendo en cuenta que las dos figuras anteriores son únicamente dos muestras de entre todas las imágenes resultantes, es posible apreciar también la evolución de la temperatura en el tiempo, al ubicarse en un pixel determinado sobre las imágenes de la probeta y ver la curva dada para toda la secuencia de termogramas. Las figuras 4.1.6 y 4.1.7, corresponden al comportamiento de la temperatura para ambos modos de adquisición.

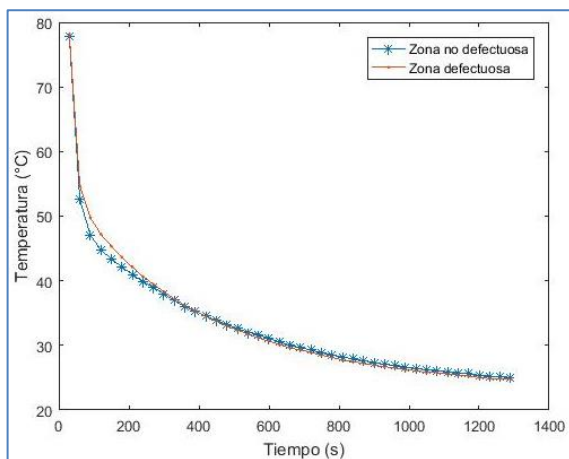


Figura 4.1.6 Enfriamiento de la muestra de PMMA según los datos tomados en reflexión.

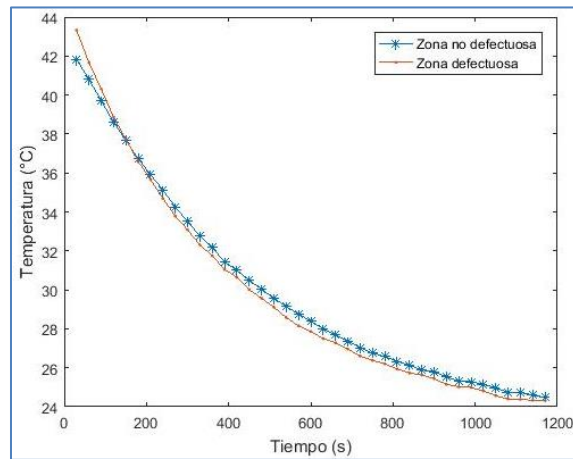


Figura 4.1.7. Enfriamiento de la muestra de PMMA según los datos tomados en transmisión.

En ambos gráficos se evidencian diferencias entre zonas sanas y defectuosas, siendo mayores los valores de temperatura para las zonas defectuosas en algunos momentos determinados.

4.1.3. Termografía Pulsada

En los ensayos de termografía pulsada se obtuvieron termogramas como se muestran en las siguientes figuras, las cuales revelan algunas imperfecciones con mejor definición que otras, dependiendo de la cara sobre la cual impactó el pulso de calor, por ejemplo las figuras 4.1.8 y 4.1.9, corresponden a una captura en modo transmisión, donde la energía térmica impactó sobre las imperfecciones y se difundió hasta la otra cara de la muestra, y al tomarse las imágenes se puede apreciar la evolución entre ellas, ya que en distintos tiempos son también visibles distintos defectos.

Las figuras 4.1.10 y 4.1.11 son de la realización del experimento en modo reflexión, en el cual el pulso de calor impactó sobre la superficie lisa y sobre ella misma se hizo el muestreo de los termogramas, y se ve que las áreas de las imperfecciones son más difusas. La parte de las imágenes que revela una zona con la mayor temperatura, es una zona del laboratorio donde estaba encendido uno de los equipos, sin embargo esto no interfirió en ninguna manera al desarrollo del experimento ni del procesamiento.

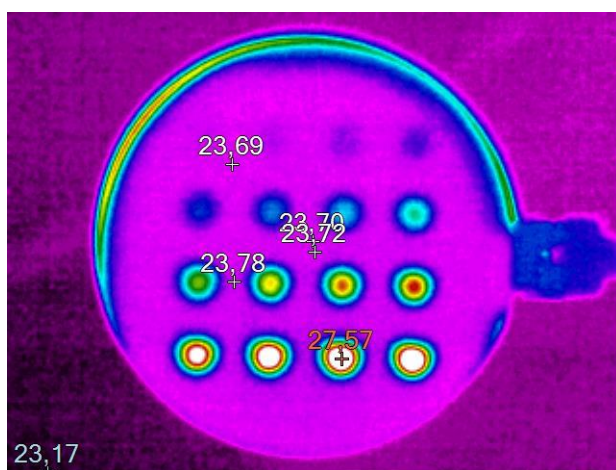


Figura 4.1.8. Termograma adquirido a los 9 s de la aplicación del pulso de calor en modo transmisión.

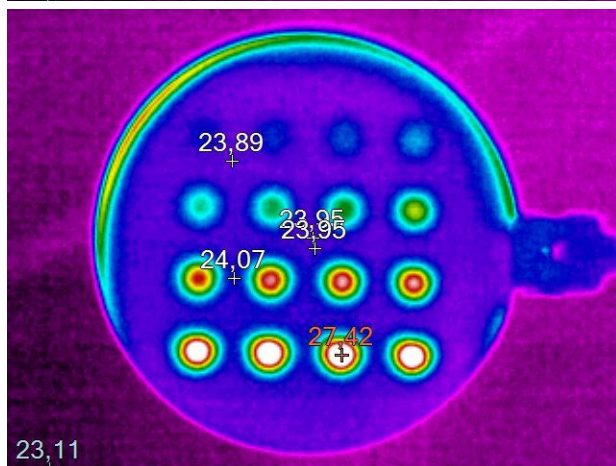


Figura 4.1.9. Termograma adquirido a los 18 s de la aplicación del pulso de calor en modo transmisión.

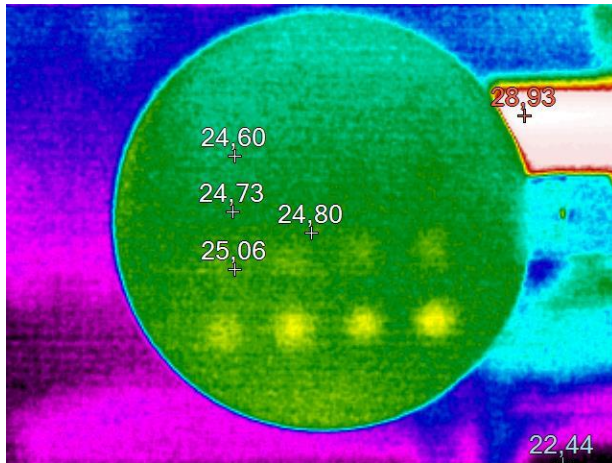


Figura 4.1.10. Termograma adquirido a los 18 s de la aplicación del pulso de calor en modo reflexión.

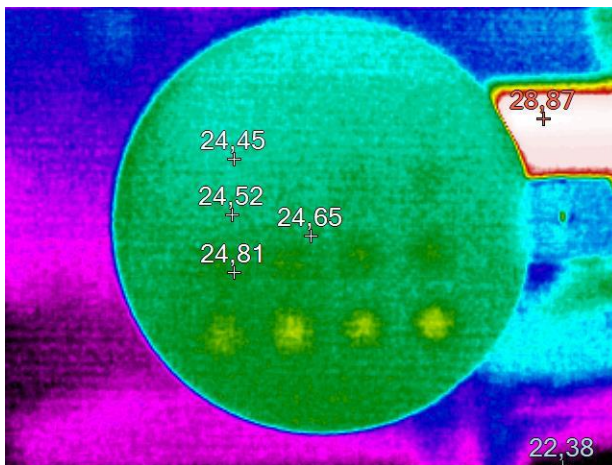


Figura 4.1.11. Termograma adquirido a los 27 s de la aplicación del pulso de calor en modo reflexión.

De las figuras anteriores es evidente que la mejor manera de detectar imperfecciones que están por debajo de la superficie es mediante el modo transmisión, ya que provee la posibilidad de verlas con más claridad que el modo reflexión. Se tiene además que la evolución de la temperatura en el tiempo para los ensayos de pulsada en transmisión y reflexión, se muestra en las figuras 4.1.12 y 4.1.13, respectivamente.

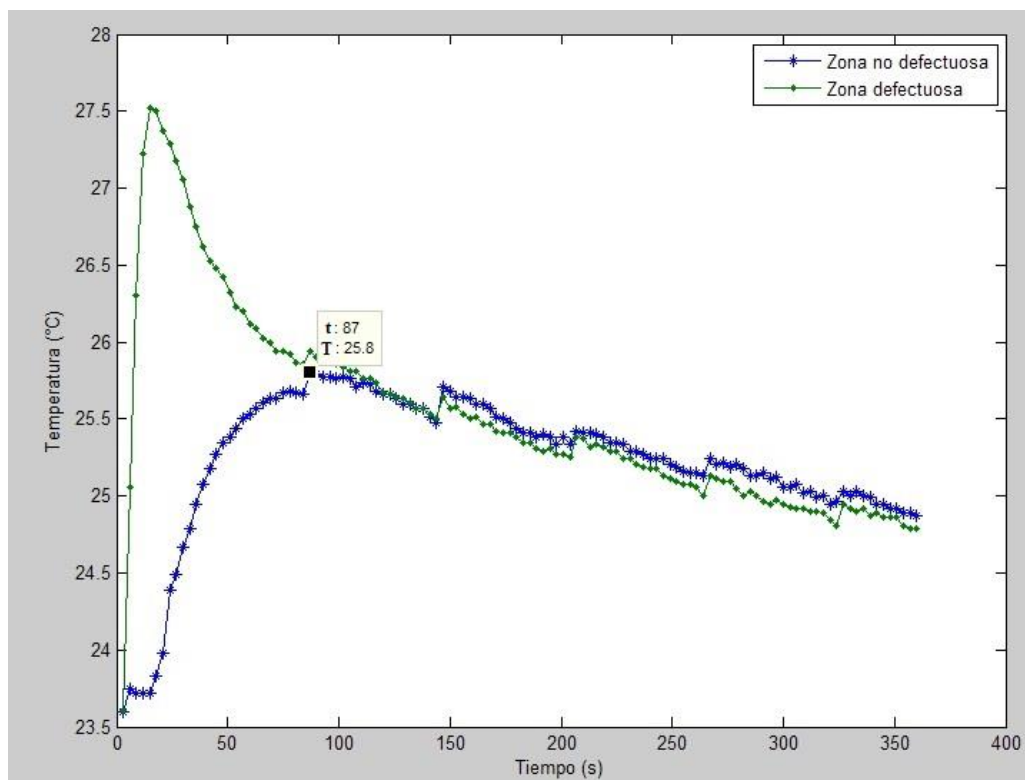


Figura 4.1.12. Evolución de la temperatura del modo transmisión para 120 imágenes.

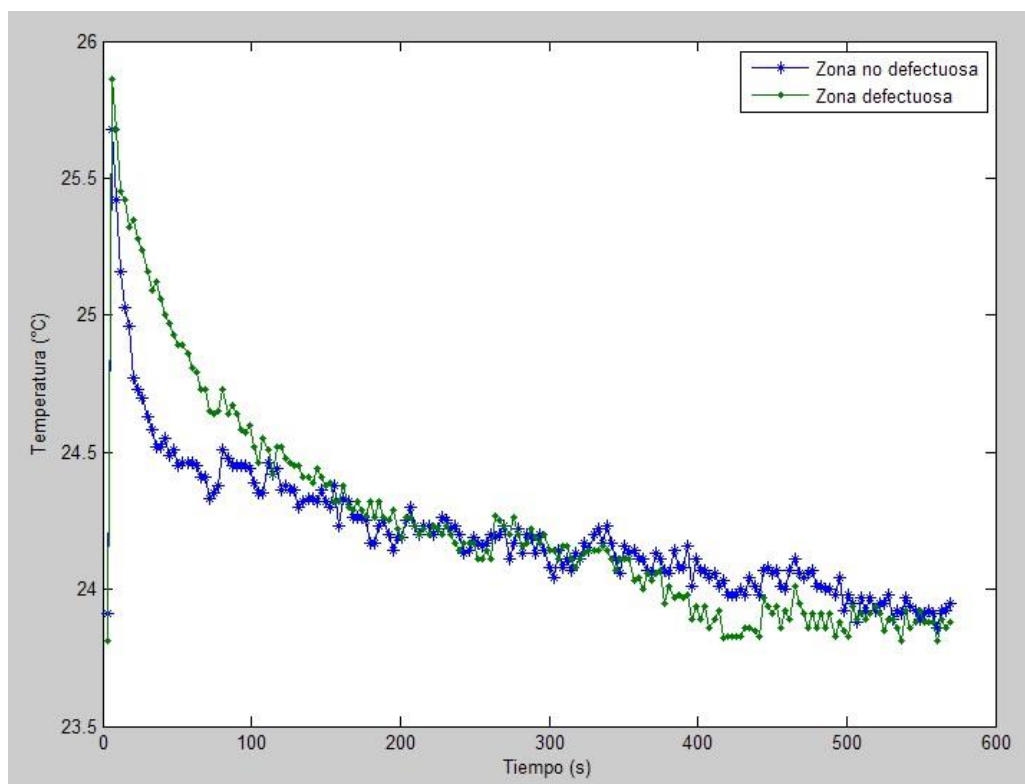


Figura 4.1.13. Evolución de la temperatura del modo reflexión para 180 imágenes.

Las dos figuras anteriores muestran el comportamiento esperado, es decir, las zonas defectuosas se calientan más rápidamente y logran además temperaturas mayores que las zonas sanas

4.2. Estimación del diámetro de las imperfecciones

Recordando que la estimación del diámetro de las imperfecciones se desarrolló mediante dos caminos y en ambos modos de adquisición. El primer camino fue la implementación de un algoritmo de segmentación y el otro fue el cálculo de los valores de contraste de temperatura absoluto. Del primer método se tienen las figuras 4.2.1 y 4.2.2, y las gráficas de las figuras 4.2.3 y 4.2.4 para los contrastes.

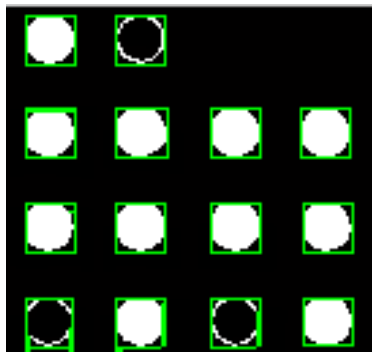


Figura 4.2.1. Segmentación de la muestra de la adquisición en reflexión.

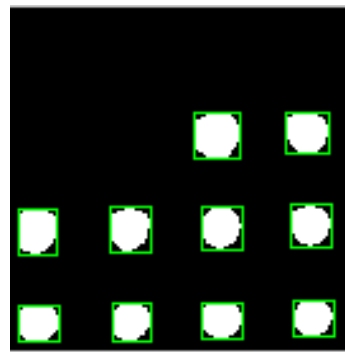


Figura 4.2.2. Segmentación de la muestra de la adquisición en transmisión.

Los resultados de la adquisición en modo reflexión revelan una mayor cantidad de imperfecciones, 14 para ser exactos, mientras que del modo transmisión fue posible la detección de únicamente diez imperfecciones. En ambas imágenes segmentadas se pueden ver las imperfecciones con mayor profundidad, siendo las de profundidad 0.2 mm y 0.3 mm, prácticamente invisibles a la cámara termográfica. A continuación se muestran las gráficas para los contrastes de temperatura absolutos de cada una de las cuatro secciones en las cuales se dividió la probeta para el procesamiento.

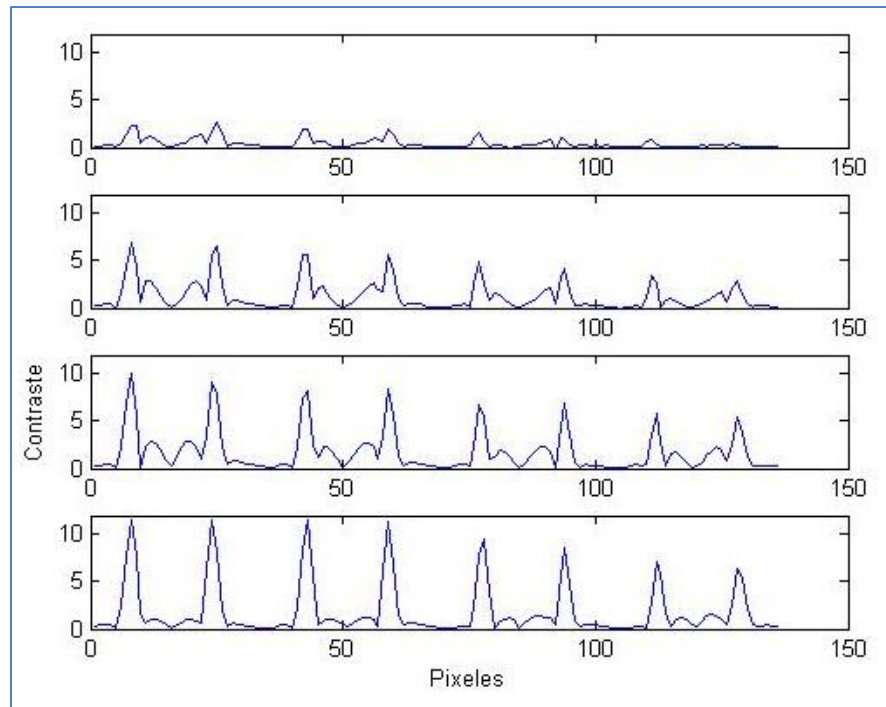


Figura 4.2.3. Gráfica de contraste de los datos tomados en **reflexión**.

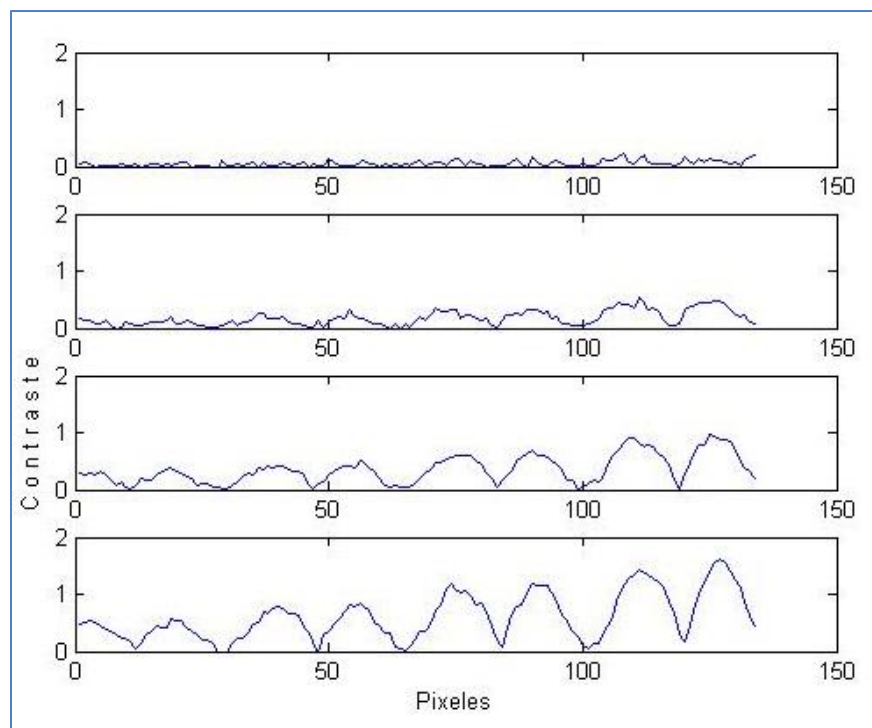


Figura 4.2.4. Gráfica de contraste de los datos tomados en **transmisión**.

Las dos gráficas anteriores revelan picos de valores máximos de contraste, el valor en píxeles entre un pico y su consecutivo es el número que representa el diámetro de la imperfección y mediante la conversión con el uso de la resolución espacial, se pudo obtener el valor del diámetro en mm. Este procedimiento es igual para la segmentación, es decir, los píxeles que atraviesan de lado a lado el recuadro fosforescente corresponden a los diámetros de las imperfecciones y de ellos se pudieron determinar los valores en unidades de longitud. Se debe tener en cuenta que la segmentación y los contrastes obtuvieron en cada imperfección, el mismo número de píxeles que atravesaban sus diámetros.

La tabla 2 muestra el número de píxeles a lo ancho y alto de las imperfecciones, además de los valores en mm posteriores a la conversión, una comparación para ambos modos de adquisición, además del cálculo del promedio del diámetro, la desviación estándar y la incertidumbre tipo A.

CUANTIFICACIÓN DE LOS DIÁMETROS								
	Modo Reflexión				Modo Transmisión			
Def	X	Y	Øx (mm)	Øy (mm)	X	Y	Øx (mm)	Øy (mm)
1	NV	NV	NV	NV	NV	NV	NV	NV
2	NV	NV	NV	NV	NV	NV	NV	NV
3	16	16	10,29	10,29	NV	NV	NV	NV
4	16	16	10,29	10,29	NV	NV	NV	NV
5	16	16	10,29	10,29	NV	NV	NV	NV
6	16	16	10,29	10,29	NV	NV	NV	NV
7	17	16	11,03	10,29	16	16	10,29	10,29
8	16	16	10,29	10,29	15	14	9,56	8,82
9	16	16	10,29	10,29	13	15	8,09	9,56
10	16	15	10,29	9,56	14	15	8,82	9,56
11	16	16	10,29	10,29	14	14	8,82	8,82
12	16	16	10,29	10,29	14	14	8,82	8,82
13	16	16	10,29	10,29	14	12	8,82	7,35
14	16	16	10,29	10,29	13	13	8,09	8,09
15	16	16	10,29	10,29	14	12	8,82	7,35
16	15	16	9,56	10,29	14	12	8,82	7,35
	Promedio		10,29	10,24	Promedio		8,89	8,60
Promedio Total			10,26		8,75			
σ			0,24		0,86			
Ua			0,05		0,27			

Tabla 2. Resultados de la cuantificación de los diámetros. (NV: No visible)

Teniendo en cuenta que el valor real del diámetro es de 10 mm, podría decirse, que el algoritmo de segmentación fue exitoso, ya que además de ser preciso, es también exacto pues se obtienen valores cercanos entre sí, y además cercanos al valor real.

4.3. Estimación de la difusividad del PMMA

Basados en la norma ASTM E1461-13 ^[15], se analizó la evolución de temperatura en el tiempo de uno del ensayo PT en modo transmisión para el cual se tomaron 120 imágenes con una frecuencia de muestreo de 0.33 Hz, del cual se obtuvo el comportamiento de la figura 4.1.12.

De la gráfica es posible afirmar que para una zona sana, el valor de máxima temperatura se ubica en un valor de tiempo igual a 87 s y el valor donde inicia la curva de calentamiento es a los 12 s, por lo tanto es la diferencia de estos dos tiempos dividida por dos ($t_{1/2}$), lo que fue utilizado para estimar la difusividad, de tal forma que:

$$\alpha = 0,13879 \frac{L^2}{t_{1/2}}$$

$$\alpha = 0,13879 \frac{(5 \text{ mm})^2}{\left(\frac{87 \text{ s} - 12 \text{ s}}{2}\right)}$$

$$\alpha = 0,093 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

De acuerdo con Montani ^[17], el cual obtuvo un valor de difusividad del plexiglás de $0,108 \text{ mm}^2/\text{s}$, es posible afirmar que el error relativo entre ambas mediciones es del 13,88%.

4.4. Estimación de la profundidad

La profundidad fue caracterizada de dos maneras, la primera es una caracterización cualitativa resultante de los procedimientos de termografía TRIR, que permite afirmar cuáles imperfecciones tienen mayor profundidad que otras, comparando únicamente con las que se encuentran en la misma sección. La segunda forma es mediante la aproximación de un valor de frecuencia ciega posterior a la aplicación de la transformada de Fourier, del cálculo de los fasegramas y de los valores de contraste de fase absoluto de cada imperfección, esto en los ensayos de PT.

4.4.1. Resultados cualitativos

Los procedimientos de TRIR realizados en reflexión y transmisión, evidencian características importantes en relación con la profundidad de las imperfecciones, a continuación se muestran las gráficas por secciones de la temperatura de todas las filas de píxeles que forman cada sección.

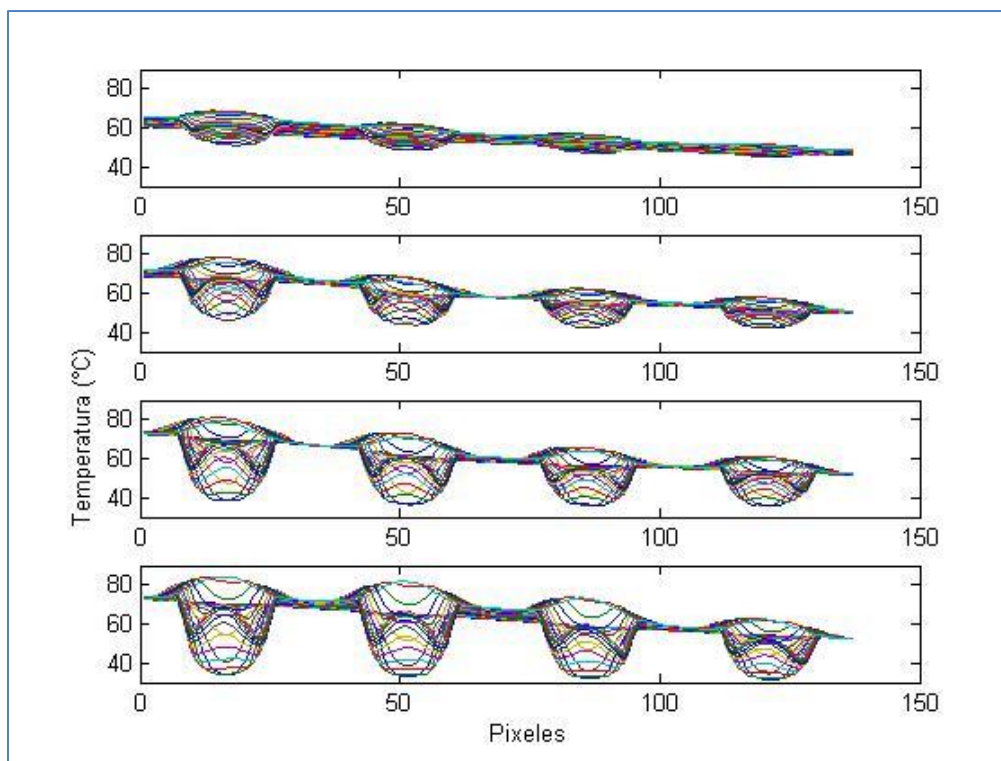


Figura 4.4.1. Gráfica de perfiles de temperatura de las secciones (**reflexión**)

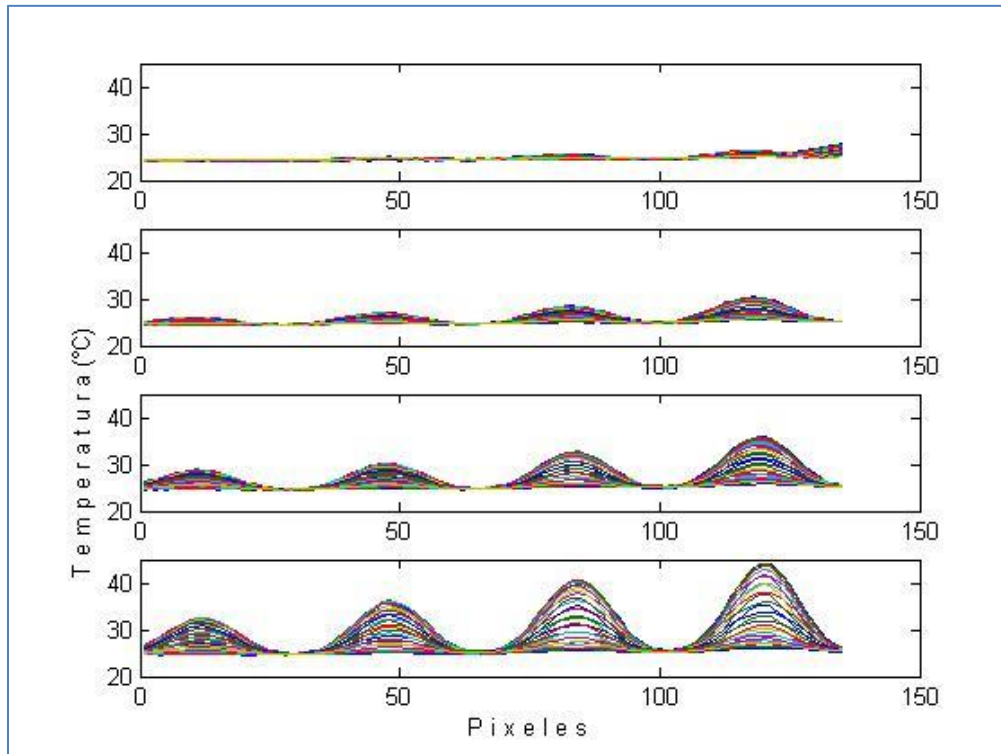


Figura 4.4.2. Gráfica de los perfiles de temperatura de las secciones (transmisión).

Las gráficas de las secciones tanto en modo reflexión como en modo transmisión permiten observar que la sección inferior posee las imperfecciones con mayor profundidad, y van disminuyendo a medida que hay un acercamiento a la sección superior. Ahora bien, para la parte superior (sección de defectos menos profundos) es evidente que el modo que provee una mejor visibilidad y acercamiento es el de reflexión, que en contraste con transmisión provee mayor información sobre qué imperfecciones tienen mayor profundidad.

4.4.2. Fasegramas obtenidos

Los fasegramas revelan algunas imperfecciones para ciertos valores de la frecuencia, las figuras 4.4.3 y 4.4.4 corresponden a imágenes de fase de termogramas adquiridos en transmisión, mientras que las figuras 4.4.5 y 4.4.6 son del modo reflexión, teniendo en cuenta que las imperfecciones se ubicaban al lado opuesto de la cámara, con el fin de simular defectos subsuperficiales. De este último ensayo, no fue posible procesar con Matlab la totalidad de las imágenes, por lo cual fue necesario implementar el código con un número menor de imágenes, se escogieron por tanto 127 imágenes de enfriamiento.

TRANSMISIÓN

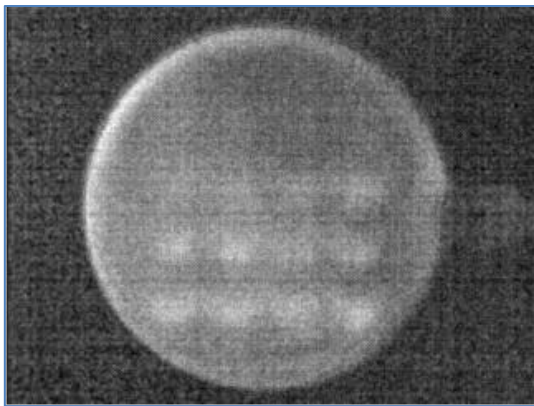


Figura 4.4.3. Fasegrama de modo transmisión para una frecuencia de 21,72 mHz

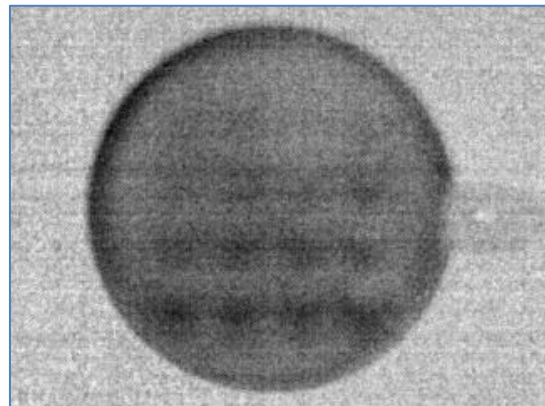


Figura 4.4.4. Fasegrama de modo transmisión para una frecuencia de 79,64 mHz

REFLEXIÓN

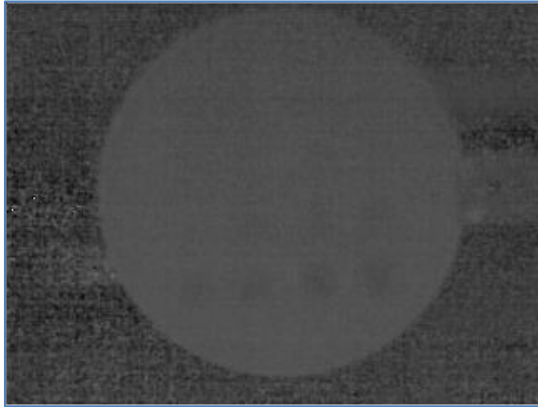


Figura 4.4.5. Fasegrama de modo reflexión para una frecuencia de 18,38 mHz.

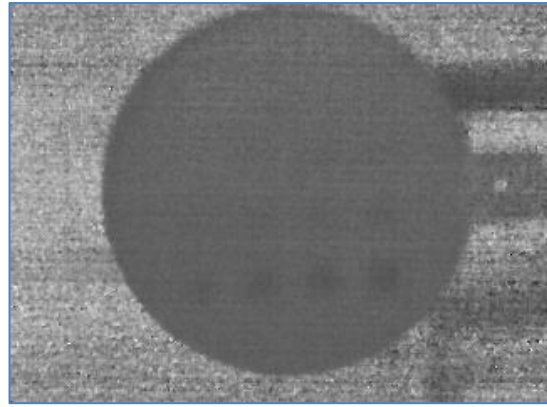


Figura 4.4.6. Fasegrama de modo reflexión para una frecuencia de 21,00 mHz.

Los fasegramas resultantes del modo transmisión evidencian con mayor claridad la mayoría de las imperfecciones, y además permiten ver que existen diferencias en los valores de la fase de las imperfecciones visibles. Las imágenes de fase correspondientes al procesamiento de los termogramas de reflexión, muestran unas leves sombras en lo que son en realidad las imperfecciones de mayor profundidad, sin embargo son fasegramas útiles en el sentido de que hay diferencias entre la fase de las distintas zonas defectuosas.

4.4.3. Fase y contraste de fase absoluto

Como se indicó en la sección 3.3.3 se realizaron las gráficas de contraste de fase absoluto para cada una de las imperfecciones en relación con la frecuencia, esperando tener dos curvas, tal como se plasmó en la figura 3.3.3, donde la parte superior es el contraste de fase absoluto y la inferior corresponde a la fase de cada defecto a lo largo de la secuencia de imágenes. Con esto en mente y sin ningún tipo de filtrado a ninguno de los conjuntos de datos, se procedió a desarrollar ambas gráficas para cada uno de los 16 defectos de la muestra de PMMA, esperando obtener los valores de frecuencia ciega de cada uno, que mediante la ecuación 3.6 entregarían las aproximaciones de la profundidad en ambos modos de adquisición. Cabe mencionar que antes de hacer visibles estos resultados, se mostrarán las curvas de enfriamiento en el tiempo de cada imperfección, para tener claridad en que realmente se dieron diferencias de temperatura entre ellas, esto se evidencia en las figuras 4.4.7 y 4.4.8.

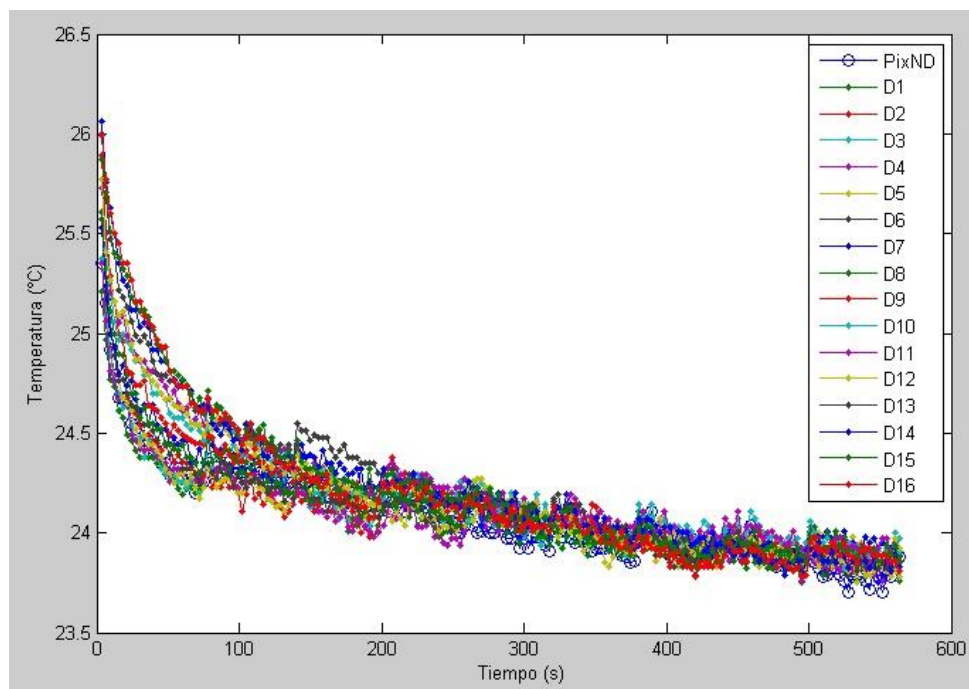


Figura 4.4.7. Enfriamiento de las imperfecciones para la adquisición en modo reflexión y un número de muestras de 180.

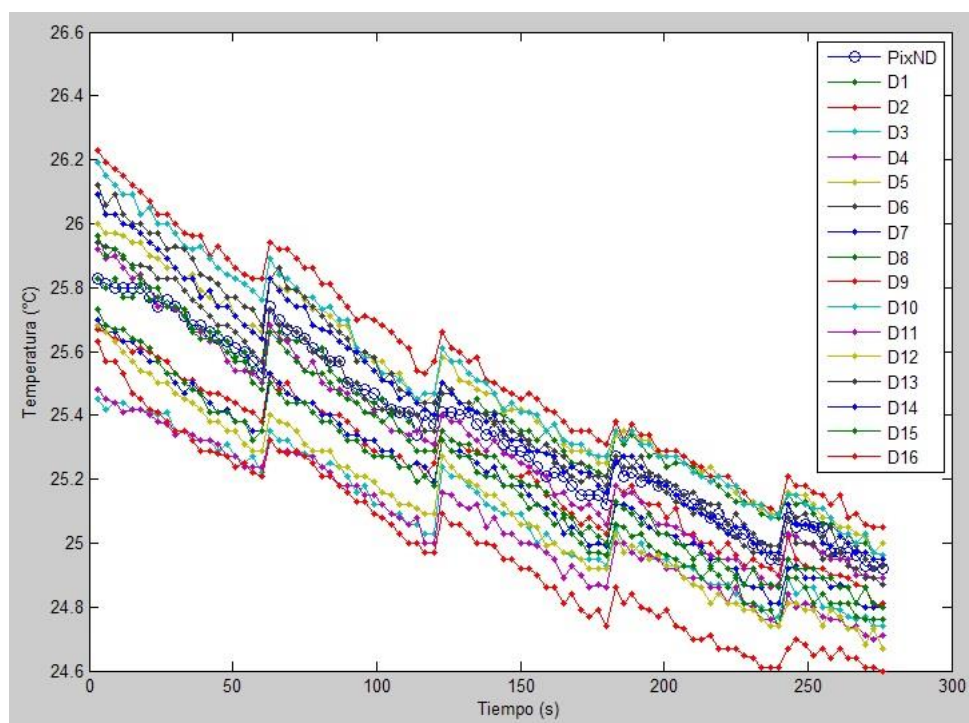


Figura 4.4.8. Enfriamiento de las imperfecciones para la adquisición en modo transmisión y un número de muestras de 120.

Es claro que en ambos modos de adquisición, se obtienen pequeñas diferencias de temperatura entre el enfriamiento de las imperfecciones, lo cual concuerda con lo esperado, puesto que el cambio en profundidad entre ellas es de 0,1 mm. Ahora bien, los resultados de la fase de cada uno de los defectos, se muestra en las figuras 4.4.9 y 4.4.10.

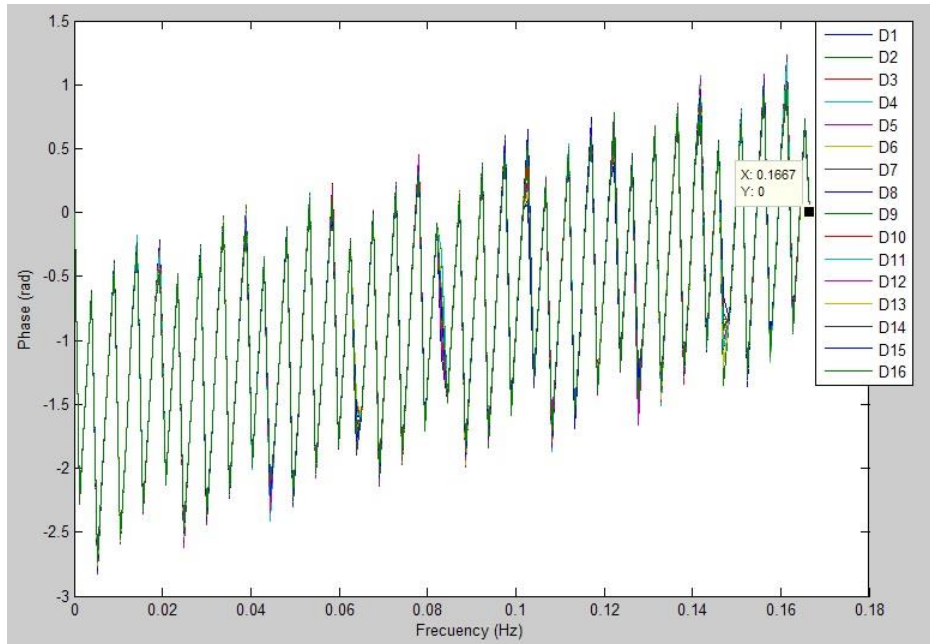


Figura 4.4.9. Fase de cada defecto en función de la frecuencia en modo reflexión.

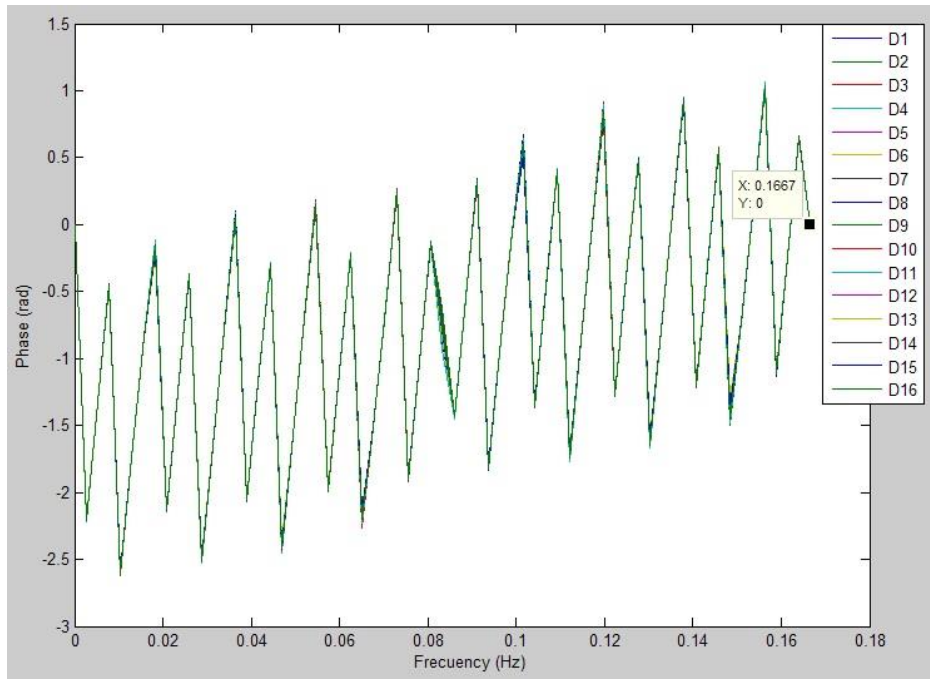


Figura 4.4.10. Fase de cada defecto en función de la frecuencia en modo transmisión.

Las dos figuras anteriores revelan la tendencia esperada, es decir, la fase disminuye hacia la parte negativa para todos los defectos y luego aumenta progresivamente hasta llegar a cero.

Sin embargo poseen una gran cantidad de ruido y además las diferencias de fase entre dos curvas son muy pequeñas. A continuación se muestran las gráficas de contraste de fase absoluto en función de la frecuencia para ambos modos de adquisición de las imágenes.

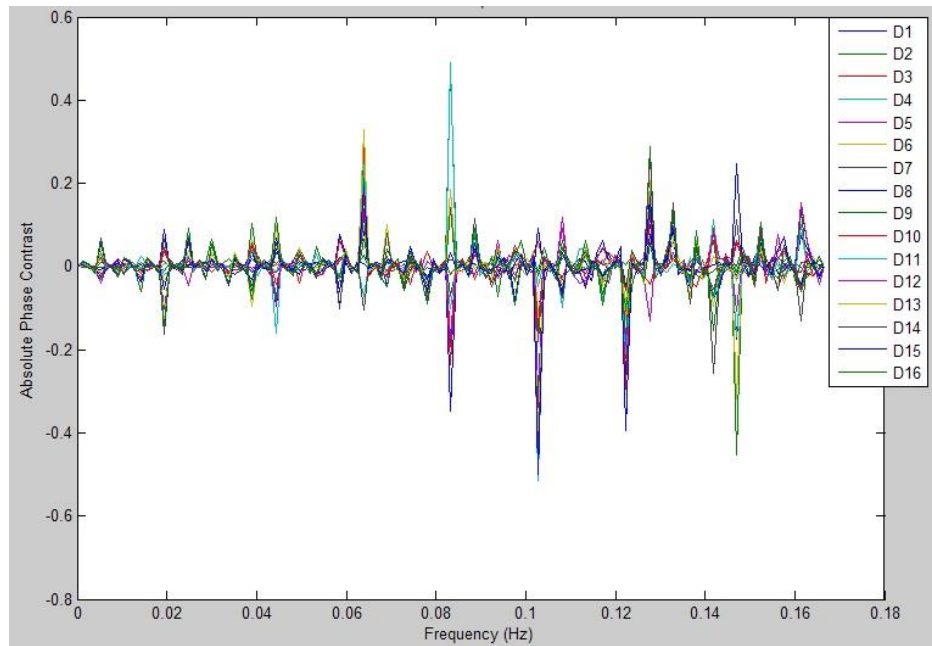


Figura 4.4.11. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo reflexión.

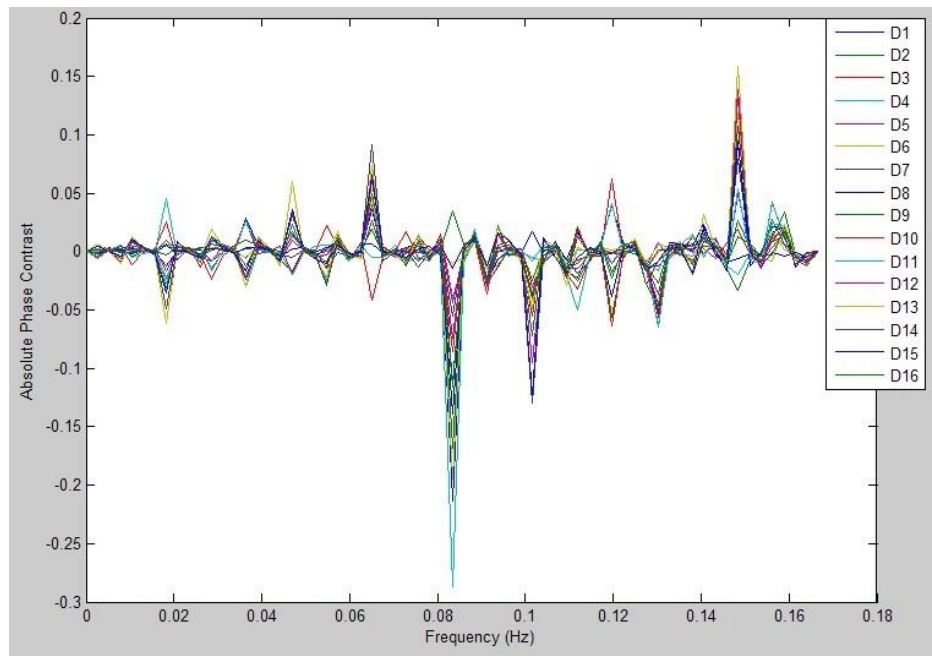


Figura 4.4.12. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo transmisión.

Las figuras 4.4.11 y 4.4.12 muestran un comportamiento que es de esperar, si se piensa en que proviene de una operación basada en la fase obtenida, la cual fue bastante

ruidosa, y no ha sido filtrada en ninguna forma. No obstante, a pesar de las pequeñas diferencias mostradas entre las fases de las imperfecciones, estas dos figuras evidencian satisfactoriamente, que existen diferencias de contraste de fase absoluto, entre las diferentes imperfecciones. Enseguida se muestran las curvas de fases para ambos modos de adquisición, luego de haberse realizado un proceso de filtrado.

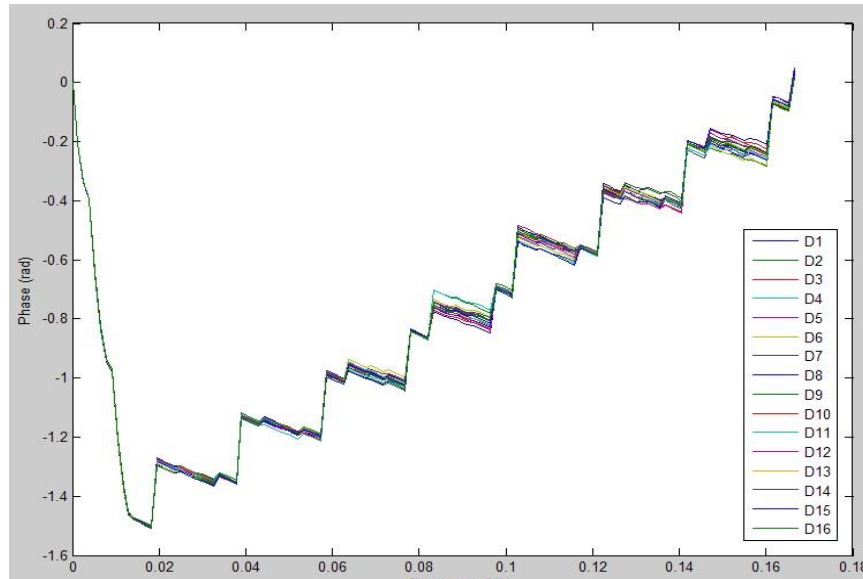


Figura 4.4.13. Fase filtrada en términos de la frecuencia en modo reflexión.

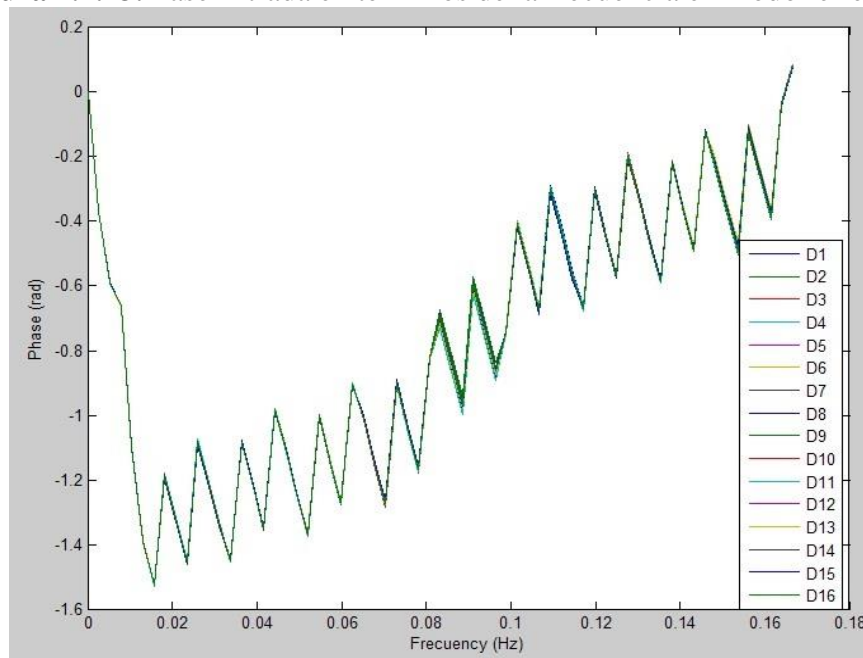


Figura 4.4.14. Fase filtrada en términos de la frecuencia en modo transmisión.

Las figuras 4.4.13 y 4.4.14 muestran una curva mucho más acertada, si realizamos la debida comparación con la curva inferior de la figura 3.3.3, inclusive se hacen más notorias las diferencias entre las fases de las imperfecciones, sobre todo en el modo reflexión. El filtro se implementó con la función *filter* de Matlab, con un tamaño de

ventana de 11 para el modo reflexión y de 6 para transmisión. Esta función implementa el filtro de la ecuación en diferencias expresada por Oppenheim ^[19]. Seguidamente se mostrarán las gráficas de contraste de fase luego de que las curvas de fase hayan sido filtradas. Se pueden ver en las figuras 4.4.15 y 4.4.16.

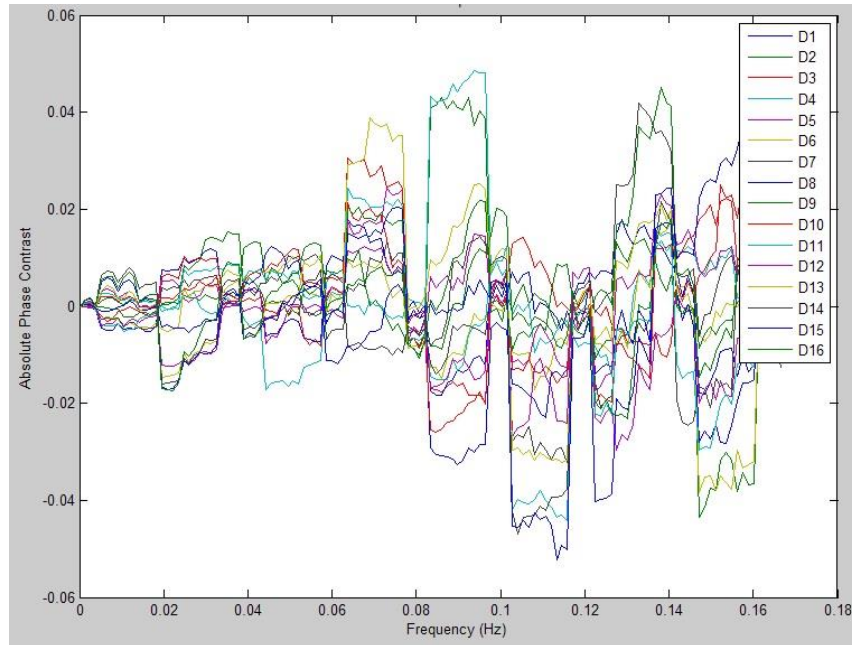


Figura 4.4.15. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo reflexión luego de que la fase fue filtrada.

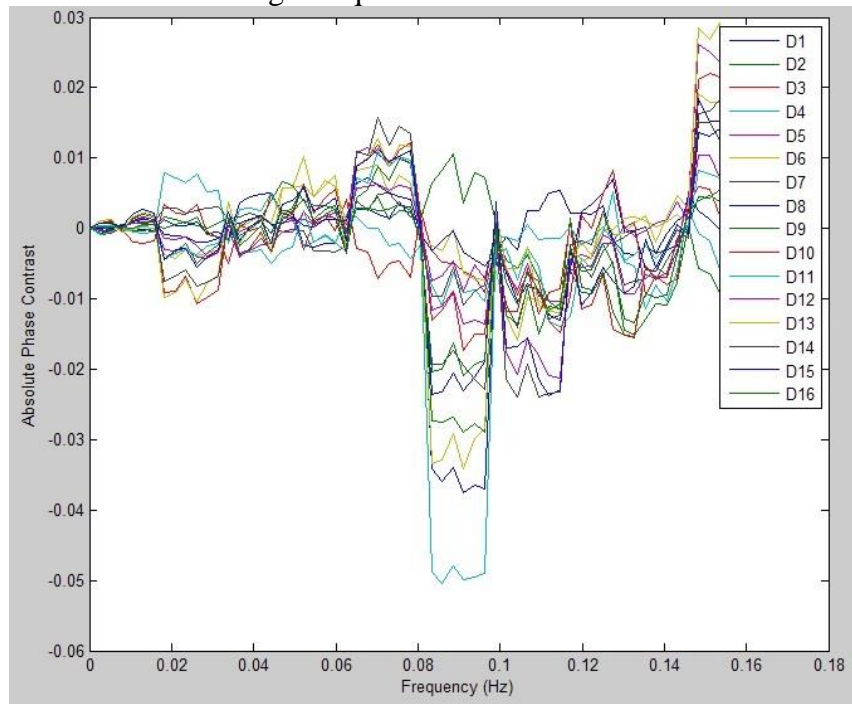


Figura 4.4.16. Contraste de fase absoluto en función de la frecuencia en modo transmisión luego de que la fase fue filtrada.

Las dos figuras anteriores evidencian diferencias entre las alturas de los contrastes de fase de las imperfecciones, y además como provienen de las curvas de fase filtradas muestran un comportamiento más próximo al esperado para obtener valores de frecuencia ciega y ser relacionados con la profundidad. A pesar de haberse realizado el proceso con datos filtrados, no fue suficiente para obtener los valores de frecuencia ciega, debido a que la fase estaba bastante ruidosa y a que la función *Autofocus* propia de la cámara termográfica Fluke TI300, generó cambios en el comportamiento real de la evolución de la temperatura en el tiempo, lo cual se evidencia claramente en los picos o máximos presentes para todas las imperfecciones en las figuras 4.4.7 y 4.4.8.

4.4.4. Protocolo final

DATOS PRELIMINARES							
Nombre responsable de la medición							
Ubicación toma de medidas							
Fecha toma de medidas		DD		MM		AAAA	
Muestra a analizar							
Hora de inicio (hh:mm)				Hora de finalización (hh:mm)			
CONDICIONES DEL ENTORNO DE MEDIDA Y LA MUESTRA							
Iluminación				Distancia Cámara-Muestra (cm)			
Temperatura Ambiente							
Emisividad de la muestra							
Difusividad de la muestra							
EQUIPO UTILIZADO							
TERMOHIGRÓMETRO							
Marca		Hygro		Temperatura Ambiente (°C)		Humedad relativa (%)	
Modelo		HTC-303A					
Número de serie		161175					
CÁMARA TERMOGRÁFICA Fluke Ti300							
Marca		Fluke		Observaciones: La cámara termográfica Ti300 es un dispositivo que detecta la radiación infrarroja y la convierte en una señal eléctrica para luego ser procesada en una imagen térmica. Rango de medición: 20°C a 650 °C.			
Modelo		Ti300					
Número de serie							
LÁMPARA DE LUZ HALÓGENA							
Marca		PAR64		Potencia		500 W	
Modelo		64 COMBO		Observaciones: La lámpara se usa como fuente de calor, con el fin de estimular la muestra a analizar. Debe tenerse en cuenta que algunos materiales no pueden ser calentados más de un tiempo determinado.			
Número de serie		33854675					
PARÁMETROS DEL EXPERIMENTO							
Técnica termográfica a implementar							
Frecuencia de muestreo o intervalo de captura				Número de muestras (imágenes)			
Modo de Adquisición				Duración del pulso de calor			
Nombre imagen inicial		IR_		Nombre imagen final		IR_	

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

5.1. Conclusiones finales

- ✓ Según los datos obtenidos para cada uno de los tiempos asignados a la duración de los pulsos en la caracterización de las lámparas, es posible observar que la temperatura antes y después de la excitación térmica, no tiene una variación significativa. Por esto se afirma que la influencia de las lámparas como componente de ruido óptico es casi nula y no es necesario tomar ningún tipo de medidas que modifiquen el sistema experimental o la forma en que se procesan los datos obtenidos en los ensayos termográficos realizados posteriormente.
- ✓ La evolución de la temperatura en el tiempo, tanto para reflexión como transmisión, mostraron el comportamiento esperado, es decir, con diferencias entre zonas sanas y defectuosas para ambas técnicas de termografía, TRIR y PT. De manera que se puede afirmar que el método de excitación térmica es efectivo, puesto que produce diferencias de contraste lo suficientemente grandes como para ver de forma separada las distintas zonas sanas y defectuosas.
- ✓ La visibilidad de las imperfecciones subsuperficiales mediante PT en modo reflexión es bastante difusa por lo cual, si se trata de detección de defectos, fisuras o delaminaciones, es mejor utilizar el modo transmisión.
- ✓ El procesamiento de las imágenes evidenció que la adquisición en modo reflexión en termografía TRIR es mucho más exacta y precisa para el cálculo del diámetro y permite ver un mayor número de imperfecciones, a diferencia del modo transmisión que revela menos defectos y además imprecisa e inexacta.
- ✓ Se obtuvieron valores de diámetro iguales a 10,26 mm, que en relación con el valor real de 10,00 mm, da un error relativo del 2,6%.
- ✓ En el análisis cualitativo de la profundidad, las imágenes de la adquisición en reflexión y transmisión revelan notoriamente la mayoría de las imperfecciones. Además es posible apreciar que en cada sección existen imperfecciones más profundas que otras, por lo cual si no se desea conocer el valor de la profundidad sino solamente cuáles tienen un valor mayor que otras, basta con la implementación de TRIR y el análisis de perfiles de temperatura en cada sección.

- ✓ Fue posible realizar el experimento y los resultados de contraste de fase absoluto en términos de la frecuencia muestran el comportamiento esperado. De acuerdo a las mediciones es posible obtener un valor aproximado de frecuencia ciega para cada imperfección si se adquieren los termogramas con una frecuencia mayor a 0,33 Hz.
- ✓ Los fasegramas obtenidos permiten observar que dependiendo del valor de la frecuencia, existen algunas imperfecciones que son más visibles que otras, sobre todo para los termogramas del modo transmisión.
- ✓ La evolución de la fase en función de la frecuencia, se vio afectada por los cambios en las gráficas de temperatura, generados por la función *Autofocus* de la cámara termográfica Fluke TI300, debido a que se tomaron las imágenes con la máxima frecuencia de muestreo posible para el dispositivo, de allí que el contraste de fase absoluto no permitió obtener los valores esperados para las aproximaciones de frecuencia ciega de cada imperfección de la muestra.

5.2. Perspectivas de trabajos futuros

- ✓ Se pueden implementar las mismas técnicas variando parámetros como el número de imágenes a adquirir, la frecuencia de muestreo e inclusive cambiando el material por otros tipos de polímeros, sin necesidad de realizar cambios en la forma de adquirir los datos y de procesarlos.
- ✓ Es posible implementar las mismas técnicas y códigos en materiales metálicos, con la consideración de que debe ser usada una cámara termográfica que adquiera termogramas con una frecuencia de muestreo mucho mayor.
- ✓ Luego de la realización del análisis PPT mediante el uso de la transformada de Fourier (TF), es posible implementar esta técnica con otro tipo de transformadas como las wavelets, las cuales conservan información temporal a diferencia de la TF, y esto serviría para realizar cálculos más aproximados de la profundidad.
- ✓ El cálculo de la profundidad de imperfecciones puede ser desarrollado aumentando las diferencias de profundidad entre ellas, corrigiendo el cambio en las curvas de temperatura generado por el autofocus y/o implementando otro tipo de filtro para las gráficas de fase.
- ✓ Se pueden realizar ensayos y análisis sobre muestras con dos materiales de distintas densidades, para que se cuantifiquen algunas características geométricas de zonas con un determinado material, implementando TRIR, PT o PPT.

CAPÍTULO 6

6. EVENTOS

Algunas partes de este trabajo de grado han sido objeto de distintas ponencias en encuentros académicos, tres eventos han sido de carácter nacional y un cuarto internacional, a continuación se especifican los diferentes escenarios:

6.1. EVENTOS NACIONALES

Autores: Miguel A. Cifuentes Marín, Milton Medina Barreto

Título: Cuantificación de Imperfecciones Controladas Mediante la Aplicación de Termografía de Fase Pulsada a Plexiglás

Tipo de participación: Ponencia oral

Congreso: VII Encuentro Departamental de Semilleros de Investigación de Risaralda. Pereira, Colombia, Mayo 17, 2017.

Autores: Miguel A. Cifuentes Marín, Milton Medina Barreto

Título: Comparación entre la Adquisición en Modo Reflexión y Transmisión en el Uso de Radiometría Infrarroja Resuelta en Tiempo Aplicada a Poli-Metilmecrilato.

Tipo de participación: Ponencia oral

Congreso: XXVII Congreso Nacional de Física. Cartagena, Colombia, Octubre 03- 06, 2017.

Autores: Miguel A. Cifuentes Marín, Milton Medina Barreto

Título: Cuantificación de Imperfecciones Controladas Mediante la Aplicación de Termografía de Fase Pulsada a Plexiglás

Tipo de participación: Ponencia oral

Congreso: VII Encuentro Regional de Semilleros de Investigación. Manizales, Colombia, Octubre 18- 19, 2017.

6.2. EVENTOS INTERNACIONALES

Autores: Miguel A. Cifuentes Marín, Milton Medina Barreto

Título: Quantification of Controlled Imperfections in a Sample of Poly (methyl methacrylate) by the Application of Pulsed Phase Thermography

Tipo de participación: Ponencia póster

Congreso: International OSA Network of Students (IONS). Bogotá D.C., Colombia, Agosto 15- 18, 2017.

CAPÍTULO 7

7. REFERENCIAS Y ANEXOS

7.1. REFERENCIAS

[1] González. F. Daniel. Contribuciones a las técnicas no destructivas evaluación y prueba de procesos y materiales basadas en radiaciones infrarrojas. PhD thesis, Universidad de Cantabria, Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación, Santander, 2006.

[2] Benitez . H, Ibarra. C, Hakim. B, Maldague. X, Loaiza. H, and Caicedo. E. Procesamiento de imágenes infrarrojas para la detección de defectos en materiales. Revista Tecnura, 10(20):40–51, 2007.

[3] E. Shobhana. X-ray diffraction and uv-visible studies of pmma thin films. International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), 2:1092–1095, 2012.
70 BIBLIOGRAFÍA

[4] Salvador.F. Fibra de carbono en la fabricación de vehículos: pura fibra. Cesvimap: Publicación técnica del Centro de Experimentación y Seguridad Vial Mapfre, 20(81):10–14, 2012.

[5]Y. Çengel, Transferencia de calor y masa. Distrito Federal: McGraw-Hill Interamericana, 2007, pp. 17-26.

[6]"Introducción a los principios de la termografía", Fluke.com, 2017. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/mxes/Accesorios/thermal-imaging-accessories/BOOK-ITP.htm?PID=55774>. [Accessed: 08- May- 2017].

[7]Y. Çengel, Transferencia de calor y masa. Distrito Federal: McGraw-Hill Interamericana, 2007, pp. 61-72.

[8]G. Zauner, “Subsurface Defect Characterization in Pulsed Phase Thermography by Means of Wavelet Analysis”, 2nd International Symposium on NDT in Aerospace 2010 - Tu.1.A.2

[9] J. Morón, Señales y Sistemas. Universidad Rafael Urdaneta: Fondo Editorial Biblioteca, 2011, pp. 267-269

- [10]G. Busse, M.Bauer, W.Rippel, and D.Wu. Lock in vibro thermal inspection of polymer composites. Proceedings Quantitative Infrared Thermography 92 Eurotherm Seminar, 27, 1992, pp. 154–159.
- [11]G. Busse. Nondestructive evaluation of polymer materials. NDT E International, 27(5), 1992, pp. 253–262.
- [12] J.W Maclachlan-Spicer, W.D Kerns, L.C Aamondt, and J.C Murphy. Time resolved infrared radiometry (TRIR) of multilayer organic coatings using surface and subsurface heating. Thermosense XIV, SPIE Proceedings, 1467, 1992, pp. 248–259.
- [13]R. Osiander, J.W.M Spicer, and M.Amos. Thermal inspection of sic/sic ceramic matrix composites. Thermosense XX, SPIE Proceedings, 2245, 1998, pp. 111–119
- [14]H. Benitez, "Contribución a la Caracterización de Defectos en Termografía Infrarroja mediante Máquinas de Aprendizaje", Doctorado, Universidad del Valle, 2008.
- [15] International ASTM E1461-13, Standard Test Method for Thermal Diffusivity by the Flash Method.
- [16]C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague, "Defect depth retrieval from pulsed phase thermographic data on plexiglas and aluminum samples", International Society for Optics and Photonics, pp. 348-356, 2004.
- [17]R. Montanini, "Quantitative determination of subsurface defects in a reference specimen made of Plexiglas by means of lock-in and pulse phase infrared thermography", Infrared Physics & Technology, vol. 53, no. 5, pp. 363-371, 2010.
- [18] A. Ramírez, “Procesamiento avanzado para el análisis de materiales usando la termografía de fase pulsada”, Maestría, Pontificia Universidad Javeriana, Cali, pp. 59-62, 2011.
- [19] Oppenheim, A. V. and R.W. Schaffer. “Discrete-Time Signal Processing”, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989, pp. 311-312.

7.2. ANEXOS

7.2.1. MANUAL DE USUARIO

Descripción del manual

Este manual está diseñado para orientar en la realización de las dos etapas principales de todo ensayo termográfico, la adquisición y el procesamiento de las imágenes. Se da una guía para montar los elementos necesarios para el experimento en ambos modos de captura y en dos técnicas fundamentales de termografía, termografía con calentamiento mediante escalón de calor, también conocida como radiometría infrarroja resuelta en tiempo (TRIR), y termografía pulsada (PT), de la cual deriva la termografía de fase pulsada (PPT). Tres códigos fueron implementados, y cada uno cumple distintas funciones para una técnica determinada, en este manual se especifica el funcionamiento de cada código y cómo de ben utilizarse.

Sistema Experimental y Captura de Imágenes

Antes de aplicar cualquier técnica termográfica recuerde tener en cuenta:

- 1) *Las lámparas deben estar apuntadas directamente sobre la muestra, para esto se diseñó un sistema empírico de direccionamiento con láser.*
- 2) *No toque la muestra directamente con sus manos antes del procedimiento, esto puede afectar las mediciones. Utilice guantes especiales de temperatura, podrá encontrarlos en el laboratorio.*
- 3) *Reduzca la mayor cantidad posible de fuentes de luz o calor cercanas al espacio de la toma de imágenes. Realice la adquisición en un ambiente lo más oscuro que se pueda.*
- 4) *Cerchiórese de que todo esté debidamente conectado en la interfaz de potencia basada en relé, que comunica las lámparas con el ordenador mediante la tarjeta de adquisición de datos (NI USB6001).*
- 5) *Conecte la DAQ que viene desde la interfaz de potencia al ordenador antes de iniciar MATLAB, de no ser así el software no recibirá la tarjeta y no podrá hacer funcionar las lámparas halógenas.*
- 6) *Determine la distancia entre la cámara termográfica y la muestra, mediante el láser que viene incluido en el dispositivo. Esto no sólo mostrará el valor en metros sino que además enfocará la cámara justo sobre el espécimen.*

- 7) *Permanezca a una distancia considerable de la muestra durante la adquisición de termogramas, ya que la temperatura corporal puede afectar las mediciones.*
- 8) *Las muestras que tengan una baja emisividad deben ser pintadas color negro mate para reducir los efectos del brillo, ya que podría ser una fuente de ruido en las imágenes. Esto ubicará la emisividad de su superficie en un valor de aproximadamente 0,95.*

Si desea realizar cualquier técnica de termografía (excepto la vibrotermografía) en modo transmisión, implemente el sistema de la figura 1, de lo contrario, si su necesidad es adquirir en modo reflexión, ubique la cámara como lo muestra la figura 2.

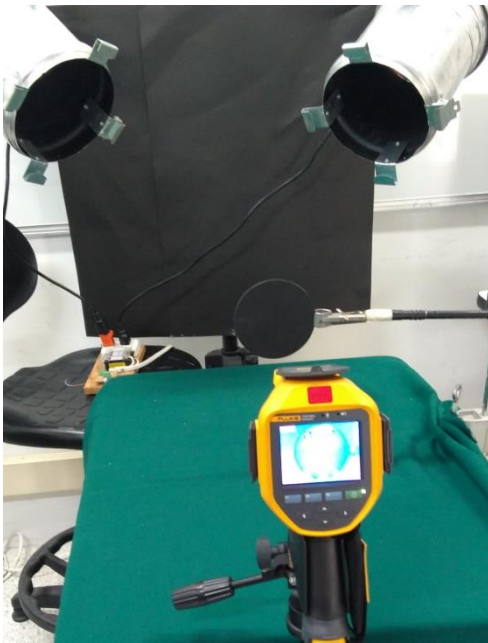


Figura 1. Sistema de adquisición en modo transmisión.

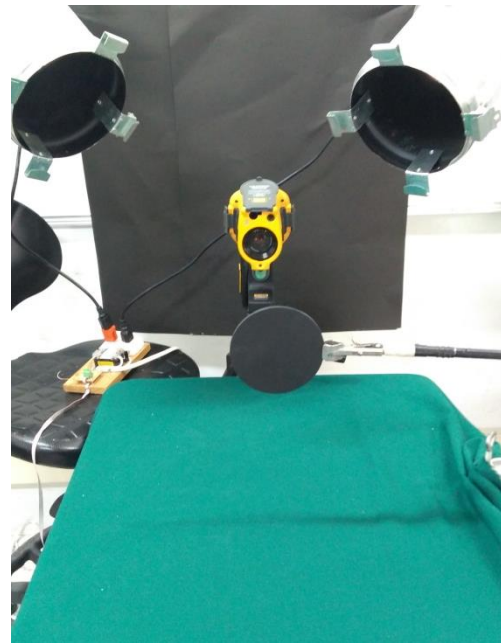


Figura 2. Sistema de adquisición en modo reflexión.

Luego de tener implementado uno de los sistemas de las figuras, defina los parámetros actuales de la temperatura ambiente y la emisividad, en la cámara termográfica, para ello siga los siguientes pasos:

- 1) Encienda la cámara y luego toque la pantalla.

- 2) Presione **Medidas** y seleccione la opción llamada **Segundo Plano**, determine el valor de temperatura marcado por el termohigrómetro, en la parte inferior de la pantalla elija **Listo**.
- 3) Ingrese nuevamente a **Medidas** y selecciones **Emisividad**, elija **Ajustar Valor** y ponga la emisividad del material a analizar.

Ahora bien, defina en la cámara la ubicación que prefiera para las imágenes en memoria, además del número de imágenes a adquirir y el intervalo de adquisición. Para esto siga las siguientes instrucciones:

- 1) En el menú principal elija la opción llamada **Memoria** y especifique la que desee (micro SD, USB o memoria interna).
- 2) En el menú principal seleccione **Cámara**, luego elija **Autocaptura**, y en las opciones generadas seleccione el número de imágenes que desea capturar y elija **Intervalo** para especificar cada cuántos segundos tomará una imagen.

Es necesario tener en cuenta que antes de la captura, debe dejar el dispositivo en la opción **Cámara** del menú principal, para que antes de la aplicación del pulso de calor solo sea presionar **Iniciar Captura**.

Siguiendo estos pasos queda especificar la duración del pulso en la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) y que inicie la captura. Con este fin siga los pasos:

- 1) Tenga la DAQ conectada al ordenador. Abra el archivo llamado **Termografía**, que se encuentra en la carpeta de **Matlab** contenida en **Documentos**.
- 2) Cuando ejecute este código, se abrirá la siguiente ventana:

Tiempo Cuenta Regresiva (s)		Cuenta Regresiva	
1		1	
Duración del Pulso (ms)			
500			
Iniciar			

Figura 3. Ventana para especificar la duración del encendido de las lámparas.

En la caja de texto llamada **Duración del Pulso**, digite el valor en milisegundos que corresponde a la excitación térmica que utilizará, y donde dice Cuenta Regresiva escriba un valor en segundos que será el espacio de tiempo justo antes de que se inicie la captura.

- 3) Espere a una distancia considerable de la muestra que ha sido excitada térmicamente hasta que en la pantalla de la cámara aparezca el mensaje “*Autocaptura completa*” y entonces seleccione aceptar.

Códigos de procesamiento de las imágenes

Uso de SmartView

Con este software es posible exportar las imágenes termográficas en distintos formatos como BMP, JPEG, PNG o TXT. En el caso de los códigos implementados, todos los termogramas fueron trabajados en formato de texto siguiendo las siguientes indicaciones:

- 1) SmartView permite abrir lotes de 15 imágenes o menos, es decir, si desea ver en el software una cantidad de 60 imágenes para analizarlas o exportarlas, debe abrirlas en 4 paquetes de 15.
- 2) Con las imágenes abiertas, seleccione **Fichero** y luego **Exportar todo**.
- 3) En la ventana emergente seleccione **Datos de temperatura**, para exportar las imágenes en formato txt, mediante matrices compuestas por los valores de temperatura de cada pixel.
- 4) Si es su deseo puede incluir marcadores de puntos específicos de la imagen, pero en los códigos implementados no se realizó de esa manera.

Uso de Matlab

Existe la posibilidad de utilizar tres códigos que han sido implementados en Matlab, el código llamado *EvolucionTemperatura.m* sirve para analizar la evolución de la temperatura de una secuencia de imágenes sobre un pixel específico y además ver la gráfica en el dominio del tiempo y de los logaritmos. El denominado *PerfilesContrastes.m* divide la imagen en cuatro secciones horizontales con igual número de pixeles de área para posteriormente hacer la gráfica de la temperatura de cada fila de la matriz por sección, es decir, una gráfica por cada una de ellas. Además, mediante un algoritmo de segmentación se señalan las imperfecciones presentes en la muestra, se calculan los contrastes de temperatura absolutos sobre cada sección. El último código se llama *PPT.m* y sirve para

aplicar la transformada de Fourier sobre pixeles específicos del termograma, calcular y mostrar los fasegramas, además de obtener el contraste de fase absoluto y relacionarlo gráficamente con la frecuencia, para la aproximación de la frecuencia ciega.

Antes de utilizar cualquier código recuerde tener en cuenta:

- 1) *Los códigos no deben ser movidos de la carpeta **CodigosTermografía** del computador destinado en el laboratorio para los ensayos termográficos y el procesamiento, a no ser que se así se le indique.*
 - 2) *Para sus análisis de las imágenes copie el código base y péguelo en otra carpeta para su posterior modificación.*
 - 3) *No olvide cambiar la dirección del código base por la dirección en la que se encuentran las imágenes termográficas adquiridas y ya exportadas desde SmartView en formato txt.*
 - 4) *Especifique en el código la imagen inicial y final que adquirió en su ensayo termográfico, mediante los números que les corresponden.*
 - 5) *Los pixeles no son siempre los mismos, ya que entre distintos ensayos la muestra o cámara podrían haberse movido algunos centímetros, es por esta razón que cada vez que procese diferentes imágenes, visualice una de ellas en la que se aprecien la mayoría de imperfecciones y escoja con el puntero de Matlab, las zonas que desea analizar con el código, y tome los valores dados para **X** (columna) y **Y** (fila), e ingréselos al código.*
 - 6) *Dependiendo del número de imágenes a procesar, el software puede tardar hasta algunos minutos en ejecutar completamente el código*
-

7.2.2. ARTÍCULO PARA PUBLICACIÓN

Comparación entre la Adquisición en Modo Reflexión y Transmisión en el Uso de Radiometría Infrarroja Resuelta en Tiempo Aplicada a Poli-Metilmetacrilato

M A Cifuentes- Marín¹, M H Medina- Barreto¹

¹Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia
E-mail: miguel7@utp.edu.co

Resumen. La técnica denominada Radiometría Infrarroja Resuelta en Tiempo con escalón de calentamiento (TRIR) permite la cuantificación de las características superficiales y subsuperficiales de diferentes tipos de materiales. Este trabajo describe el acercamiento y el análisis TRIR de la respuesta en el tiempo en una probeta de poli- metilmetacrilato (PMMA), con el fin de generar imágenes de profundidad en modo de reflexión y transmisión. Se aplicó un pulso de calentamiento escalonado con una duración de 60 s a una muestra circular que contiene 16 orificios controlados (12 cm de diámetro y profundidad de 0,2 mm a 1,7 mm), las temperaturas se tomaron cada 30 s durante la excitación y el enfriamiento durante un tiempo total de 1260 s. Las gráficas de temperatura- tiempo indican que la evolución térmica de la superficie alcanzó un valor máximo aproximado de 90 °C. Se encontró una pendiente de aproximadamente 0,5 en función del comportamiento esperado de la temperatura de subida con el tiempo, pero se detectaron variaciones térmicas locales en las zonas de defecto (agujeros). Durante el procesado de imagen se empleó una aproximación simple para el contraste térmico absoluto obteniendo curvas de calibración que permitían calcular incertidumbres menores al 10% por cada defecto, en ambos diámetros como profundidad. Este resultado final muestra que la TRIR es útil y adecuada para determinar posibles imperfecciones en los polímeros en el modo de reflexión y transmisión, independientemente de que los defectos estén sobre o bajo la superficie, teniendo en cuenta que el espesor de la muestra no sea demasiado grande en comparación con su diámetro.

1. Introducción

Uno de los objetivos principales de la radiometría infrarroja resuelta en el tiempo (TRIR), es obtener información relacionada con la estructura y la temperatura de un cuerpo después de haber sido iluminado por un pulso de luz cuya duración es de algunos minutos o segundos. Esta técnica es objeto de múltiples investigaciones en la actualidad puesto que su tipo de análisis puede ser cualitativo o cuantitativo dependiendo de las necesidades y de la muestra que se desee estudiar. En este trabajo se analizó una muestra patrón de poli-metilmetacrilato (PMMA) que posee 16 imperfecciones cuyo diámetro y profundidad son conocidas, se excitó con dos fuentes de luz, y se adquirieron las imágenes correspondientes a la radiación infrarroja emitida por el espécimen en los modos de reflexión y transmisión, posteriormente mediante el procesamiento de datos en Matlab fue posible analizar el comportamiento de la temperatura a lo largo del tiempo y realizar comparaciones basados en la ecuación unidimensional de calor:

$$T = \frac{Q}{b\sqrt{\pi t}} \quad (1)$$

Donde T es la temperatura, Q es la densidad de energía sobre la superficie, b es la efusividad térmica del material y t es el tiempo. De la ecuación anterior la teoría dice que describe la evolución de la temperatura sobre la superficie de una placa semi-infinita después de haber recibido un estímulo térmico tipo delta de Dirac ^[1]. La ecuación (1) puede expresarse en el dominio logarítmico de la siguiente manera:

$$\ln(T) = \ln\left(\frac{Q}{b}\right) - \frac{1}{2}(\pi t) \quad (2)$$

La ecuación (2) revela que para una zona sin imperfecciones la pendiente de la gráfica es de 0.5, mientras que si es defectuosa, este valor tendrá variaciones. Cabe mencionar que la ecuación (1) es unidimensional pero en la realidad la difusión de calor es tridimensional, razón por la que en la práctica hubo desviaciones del comportamiento lineal y según Carslaw and Jaeger, se puede modelar la evolución de la temperatura entonces como:

$$\ln(T) = a_0 + a_1 \ln(t) + a_2 \ln(t)^2 + \dots + a_n \ln(t)^n \quad (3)$$

De allí que se modelaron estos polinomios para zonas sanas y defectuosas en ambos modos, reflexión y transmisión, para encontrar diferencias entre las distintas zonas y proceder a la aplicación de un algoritmo de segmentación y el cálculo de los contrastes de temperatura absolutos, que se obtienen mediante la ecuación (4).

$$\Delta T = T_d - T_{nd} \quad (4)$$

Donde T_d es la temperatura de una zona defectuosa y T_{nd} la de una zona sana.

2. Materiales y Métodos

Se fabricó una muestra patrón circular de PMMA de 120 mm de diámetro y 5 mm de espesor, con una cara plana y la otra con 16 imperfecciones circulares controladas y especialmente distribuidas, como lo indica la figura 1. Este diseño permite que puedan ser adquiridas las imágenes en el modo de reflexión y en el de transmisión y de esta manera establecer las debidas comparaciones. Además, es importante tener en cuenta que para gran parte del procesamiento y análisis se dividieron las imágenes de la probeta, en cuatro secciones, siendo la primera la de cuatro imperfecciones que van desde 0,2 mm a 0,5 mm y aumentando progresivamente el número de la sección hasta llegar a la cuarta que es la de imperfecciones de 1,4 mm hasta 1,7 mm.

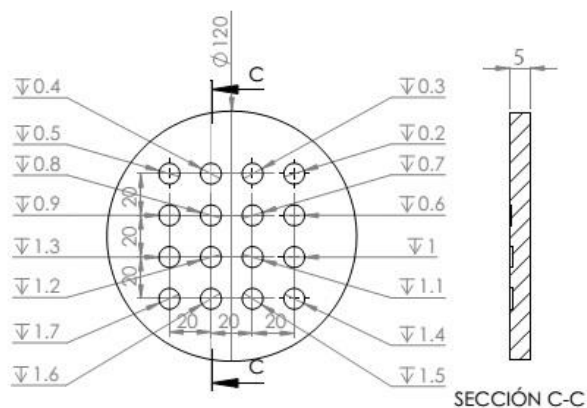


Figura 1. Muestra patrón diseñada para el procedimiento y análisis.

El sistema de adquisición de imágenes de las probetas fue diseñado de acuerdo al estado del arte para la aplicación de TRIR ^[2].

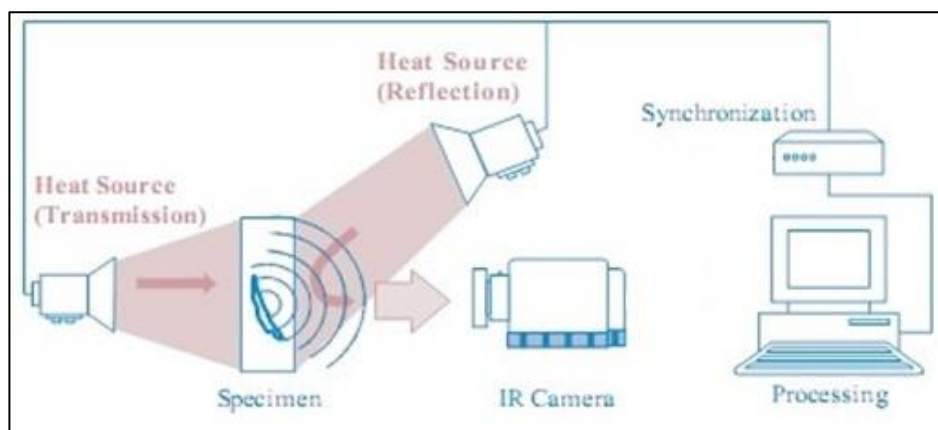


Figura 2. Sistema de adquisición ^[2].

Consta de dos lámparas halógenas de 500 W cada una, con el propósito de excitar térmica y ópticamente la muestra. Una interfaz gráfica de usuario (GUI), diseñada en Matlab, la cual proporcionó el control del tiempo que las lámparas están encendidas, mediante el acople con el computador, a través de una tarjeta de adquisición de datos (DAQ NI-USB 6001) y una interfaz de potencia basada en un relé de estado sólido que va directamente a las lámparas. Una cámara termográfica (Fluke TI300), un termohigrómetro y un termómetro, los últimos con el objetivo de medir las condiciones ambientales y la temperatura de la muestra. Para reducir la influencia de ruido óptico es óptimo realizar la toma de termogramas en un ambiente oscuro y el esquema del sistema es el mostrado en la figura 2.

Los modos de adquisición de las imágenes de temperatura se pueden apreciar en la figura 3 y son los denominados reflexión y transmisión, cuya única diferencia es la posición de la cámara termográfica respecto al espécimen de PMMA y las lámparas, y ambos pueden revelar diferentes resultados que son más exactos en uno que en el otro.

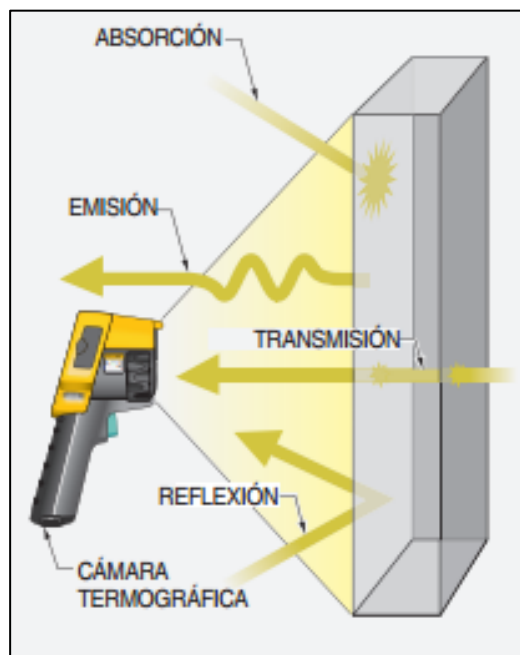


Figura 3. Principio físico de los modos de adquisición de las imágenes infrarrojas

La captura en modo reflexión es en esencia que la posición de la cámara termográfica es del mismo lado que la fuente de luz. El modo de transmisión hace referencia a que la dirección de donde proviene la iluminación es opuesta a la ubicación de la cámara sensor.

La distancia entre la cámara y la muestra de PMMA fue de 0.36 m, las lámparas se enfocaron directamente sobre esta de tal manera que la mayor cantidad de luz la irradiara. En la GUI de control se estableció que las lámparas estuvieran encendidas durante un minuto y que la cámara adquiriera las imágenes con una tasa de muestreo de 0.03 Hz (una imagen cada 30 s), dos correspondientes a la excitación y una antes de ella, además de 42 imágenes del enfriamiento tomadas en un período de 1260 s.

Posteriormente se procedió al procesamiento de los datos en Matlab, con el objetivo de analizar el comportamiento de la temperatura en zonas sanas y defectuosas, en ambos modos de adquisición, además de cuantificar las características geométricas de las imperfecciones.

Los diámetros fueron obtenidos mediante un algoritmo de segmentación y las gráficas de contraste, teniendo en cuenta la resolución espacial de la cámara, como lo indica la tabla 1.

Especificaciones generales	
Rango de medida de temperatura (no calibrada por debajo de -10 °C)	-20 °C a +650 °C (-4 °F a +1.202 °F)
Precisión de medida de temperatura	± 2 °C o 2 % (a 25 °C nominales, la mayor de ambas)
Frecuencia de captura de imágenes	Velocidad de actualización de 9 Hz.
Sensibilidad térmica (NETD)	≤ 0,05 °C a 30 °C temp. objetivo (50 mK)
Banda espectral infrarroja	7,5 μm a 14 μm (onda larga)
Resolución espacial (IFOV)	1,75 mrad
Temperatura de trabajo	De -10 °C a +50 °C

Tabla 1. Especificaciones generales de la cámara termográfica.

Las profundidades se aproximan analizando los perfiles de temperatura de las líneas centrales de los defectos, para lo cual se dividieron las imágenes, generalmente, en cuatro secciones, siendo la primera, aquella que tiene las imperfecciones menos profundas y la cuarta aquellas con mayor profundidad.

3. Resultados

Los termogramas resultantes se muestran en las figuras 4 y 5, que corresponden al modo reflexión y transmisión respectivamente.

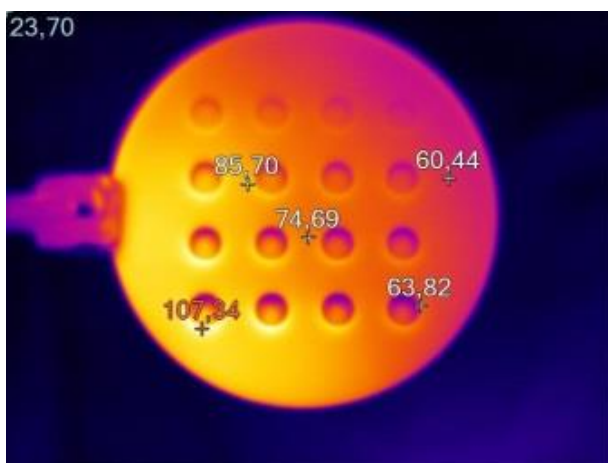


Figura 4. Termograma obtenido en modo reflexión a los 60 s.

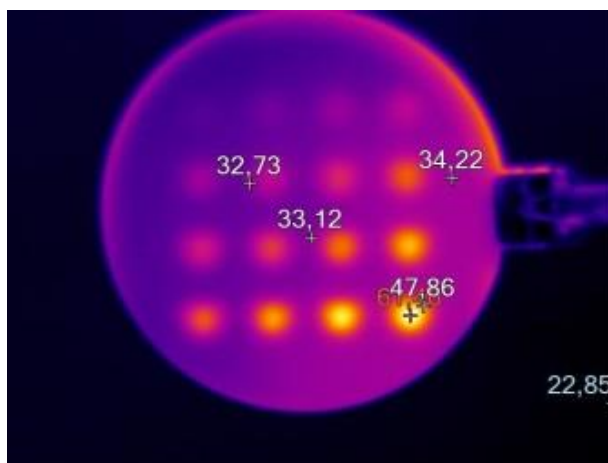


Figura 5. Termograma obtenido en modo transmisión a los 60 s.

Cada color de un pixel representa una temperatura diferente de acuerdo a la radiación infrarroja emitida por cada zona de la probeta de PMMA, es decir, en relación a las longitudes de onda radiadas por la muestra y adquiridas y procesadas por la cámara termográfica. Ahora bien, luego de la aplicación del pulso de 60 s, se evidenció el comportamiento de enfriamiento térmico del espécimen de PMMA en los dos modos de adquisición, tal como lo indican las figuras 6 y 7.

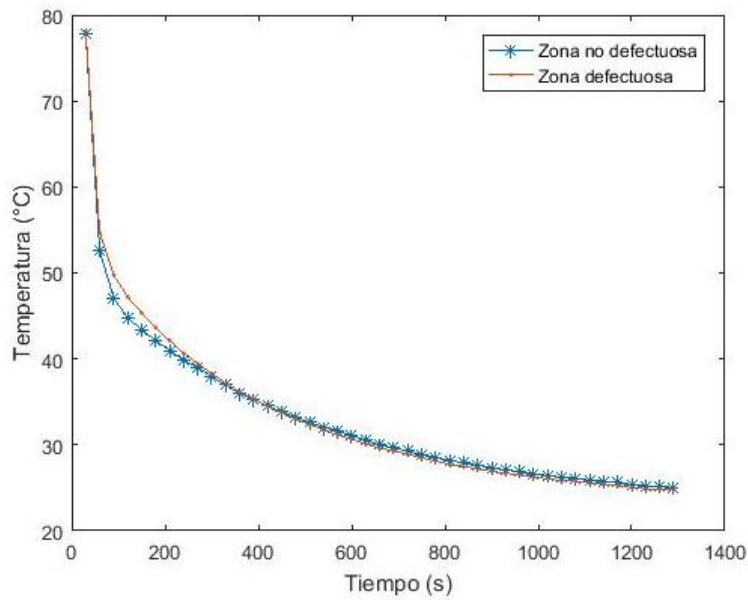


Figura 6. Enfriamiento de la muestra en modo reflexión para una zona defectuosa y una sana.

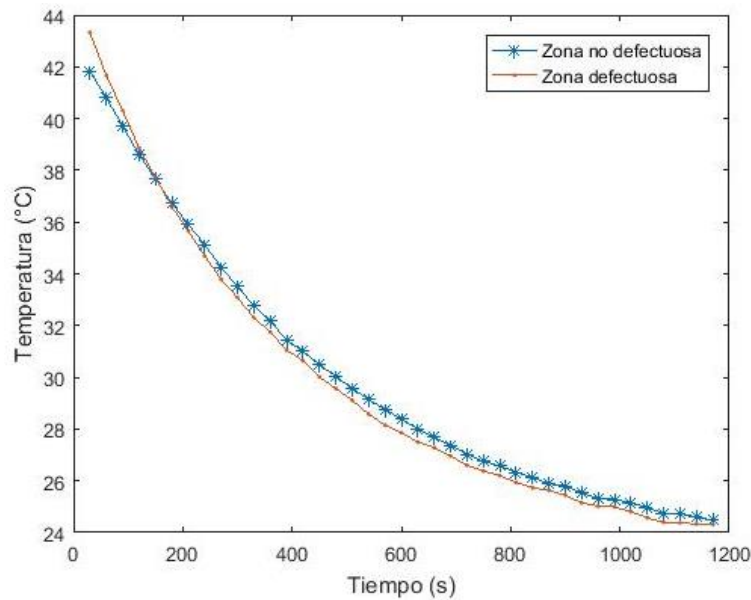


Figura 7. Enfriamiento de la muestra en modo transmisión para una zona defectuosa y una sana.

Se evidencia que las zonas defectuosas y las sanas tienen una evolución diferente de la temperatura en el tiempo. Además, teniendo en cuenta la descripción dada por la ecuación 3, se llevaron las dos gráficas anteriores al dominio de los logaritmos, y a su vez se modelaron con polinomios de grado 4, que según el coeficiente de Pearson, son lo suficientemente adecuados para los diferentes modos y zonas, como se indica en las figuras 8 y 9.

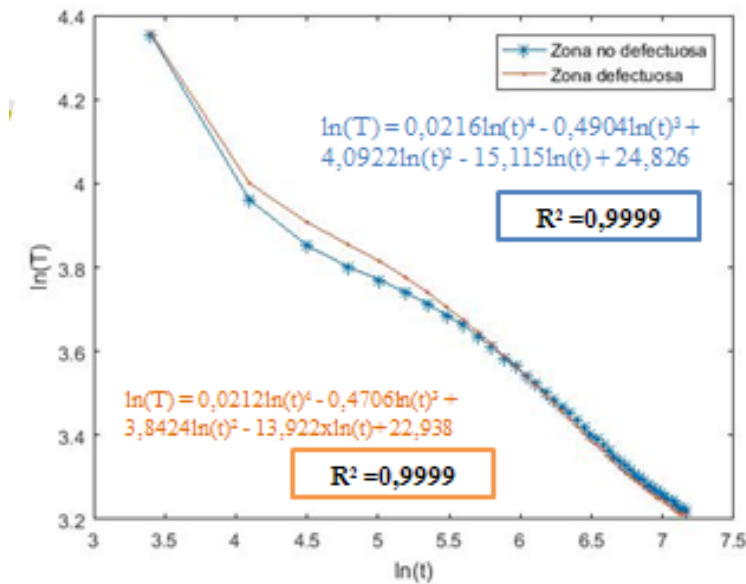


Figura 8. Enfriamiento logarítmico de la muestra de PMMA según los datos tomados en *reflexión*.

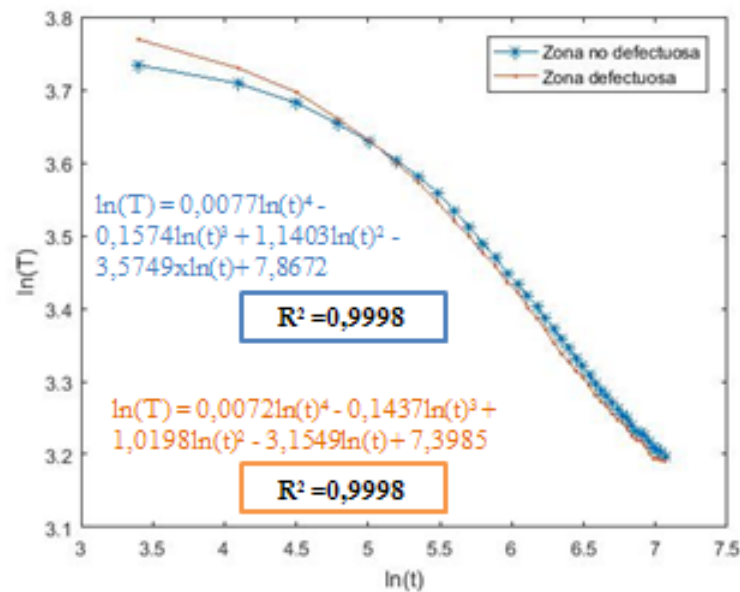


Figura 9. Enfriamiento logarítmico de la muestra de PMMA según los datos tomados en *transmisión*.

Las gráficas que corresponden al enfriamiento de la temperatura en el dominio logarítmico revelan el efecto de la difusión de calor como fenómeno tridimensional, debido a que idealmente se esperaba una ecuación lineal del tipo de la ecuación 2 que es para el caso unidimensional, sin embargo en la práctica se evidencia que debe ser modelado a partir de un polinomio de grado 4 hasta uno de grado 7.

3.3.1. Cuantificación de los diámetros

Ahora bien, conociendo que existen diferencias entre zonas sanas y defectuosas, se implementaron dos algoritmos en Matlab, el primero fue el de segmentación para detectar y cuantificar el diámetro de las imperfecciones, el segundo fue el cálculo de los contrastes de temperatura absolutos con el mismo fin. Los resultados obtenidos de estos algoritmos se presentan en las figuras 10 y 11.

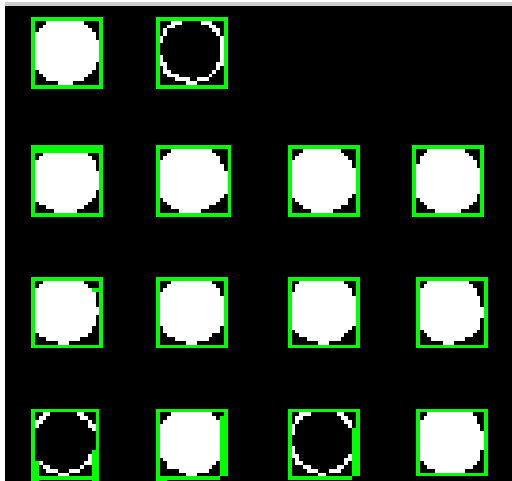


Figura 10. Segmentación de la muestra de la adquisición en reflexión.

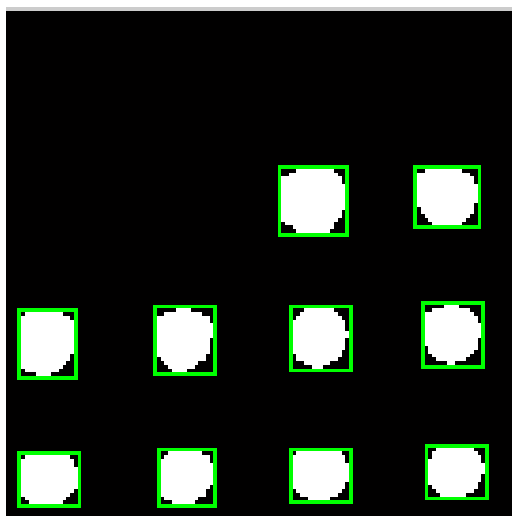


Figura 11. Segmentación de la muestra de la adquisición en transmisión.

Es evidente que el modo reflexión revela la mayoría de las imperfecciones, faltando únicamente las dos menos profundas, la de 0,2 mm y 0,3 mm; a diferencia del modo transmisión que revela

únicamente 10 defectos. Las gráficas de contraste que deben tener concordancia con la segmentación se muestran en las figuras 12 y 13.

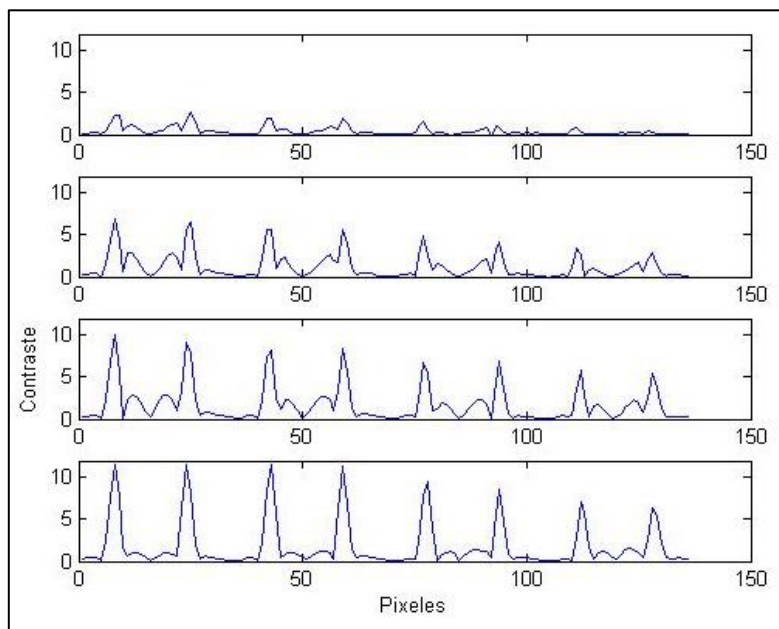


Figura 12. Gráfica de contraste de los datos tomados en reflexión.

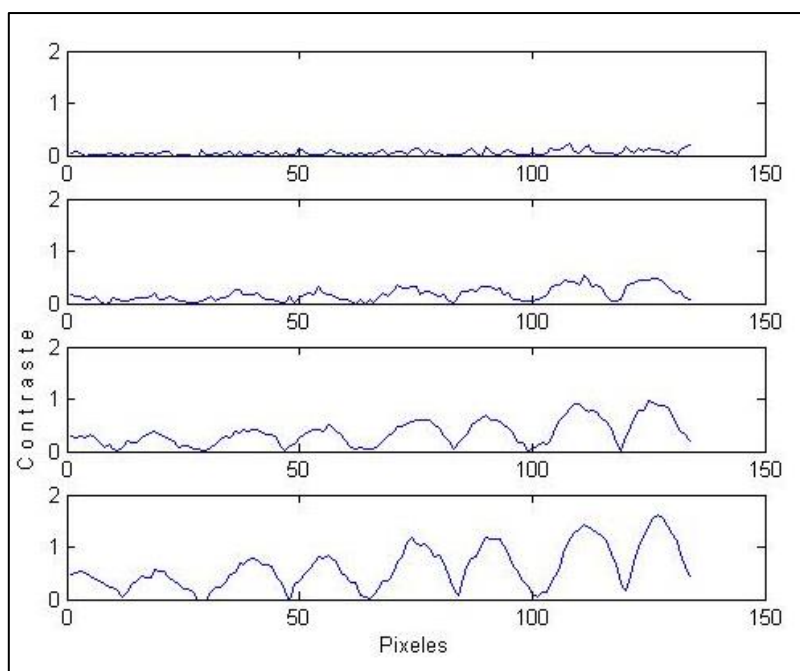


Figura 13. Gráfica de contraste de los datos tomados en transmisión.

Al contar el número de píxeles que hay de un máximo al siguiente, se dio cuenta de que concordaban estos valores, con el número de píxeles que atravesaban de un lado a otro, o de arriba abajo los recuadros fosforescentes que encierran las imperfecciones en las figuras 10 y 11. Se construyeron las tablas 2 y 3 (una para reflexión y otra para transmisión) con los valores de diámetro en píxeles y en milímetros, teniendo en cuenta el parámetro especificado en la tabla 1, denominado resolución espacial, mediante el cual se convierte de número de píxeles a valores en unidades de longitud según el esquema de la figura 14.

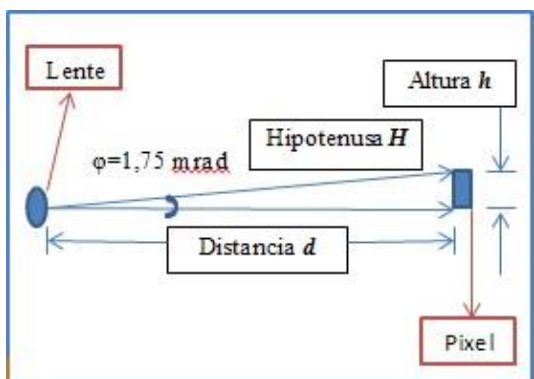


Figura 14. Resolución espacial en relación con un píxel para conversión de píxeles en unidades de longitud.

Del esquema anterior es posible llegar a la ecuación (5), que mediante una multiplicación simple entre la resolución espacial φ y la distancia d de la cámara a la muestra, obtiene el valor de un píxel en unidad de longitud.

$$h = d\varphi \quad (5)$$

Aplicando esta operación se construyeron las tablas 2 y 3, la primera de ellas es la cuantificación de los diámetros en modo reflexión y la segunda en transmisión, cabe resaltar que los valores de X y Y en píxeles, son el ancho y alto de los recuadros fosforescentes de las imágenes segmentadas. Se enumeraron las imperfecciones de 1 a 16 siendo la primera la de 0,2 mm y la última la de 1,7 mm.

Modo Reflexión				
Def	X (píxeles)	Y(píxeles)	Øx (mm)	Øy (mm)
1	NV	NV	NV	NV
2	NV	NV	NV	NV
3	16	16	10,29	10,29
4	16	16	10,29	10,29
5	16	16	10,29	10,29
6	16	16	10,29	10,29
7	17	16	11,03	10,29
8	16	16	10,29	10,29
9	16	16	10,29	10,29
10	16	15	10,29	9,56
11	16	16	10,29	10,29
12	16	16	10,29	10,29
13	16	16	10,29	10,29
14	16	16	10,29	10,29
15	16	16	10,29	10,29
16	15	16	9,56	10,29
Promedio			10,29	10,24
Promedio Total			10,26	
σ			0,24	
Ua			0,05	

Tabla 2. Cuantificación de los diámetros en modo reflexión (NV: No Visible).

Teniendo en cuenta que los valores de los diámetros reales son de 10 mm, se puede afirmar que el modo reflexión es bastante exacto y preciso a la hora de cuantificarlos, puesto que se tiene un error relativo del 2,6%.

	Modo Transmisión			
Def	X(pixeles)	Y(pixeles)	Øx (mm)	Øy (mm)
1	NV	NV	NV	NV
2	NV	NV	NV	NV
3	NV	NV	NV	NV
4	NV	NV	NV	NV
5	NV	NV	NV	NV
6	NV	NV	NV	NV
7	16	16	10,29	10,29
8	15	14	9,56	8,82
9	13	15	8,09	9,56
10	14	15	8,82	9,56
11	14	14	8,82	8,82
12	14	14	8,82	8,82
13	14	12	8,82	7,35
14	13	13	8,09	8,09
15	14	12	8,82	7,35
16	14	12	8,82	7,35
Promedio			8,89	8,60
Promedio Total			8,75	
σ			0,86	
Ua			0,27	

Tabla 3. Cuantificación de los diámetros en modo transmisión (NV: No Visible).

Analizando los valores obtenidos en esta tabla se evidencia que el modo transmisión es menos exacto que el modo reflexión, pues a diferencia del anterior modo en el cual el error relativo fue de 2,6 %, en transmisión este error aumenta al 12,5 %.

3.3.2. Análisis cualitativo de la profundidad

Realizando la gráfica de los perfiles de temperatura sobre cada sección en las que se dividió la probeta, se tiene la gráfica de la figura 15 para reflexión y de la figura 16 para transmisión, en las cuales se puede visualizar que algunas imperfecciones son más profundas que otras, sobre cada sección pero no es posible ver de sección a sección, cuáles imperfecciones son más profundas que otras.

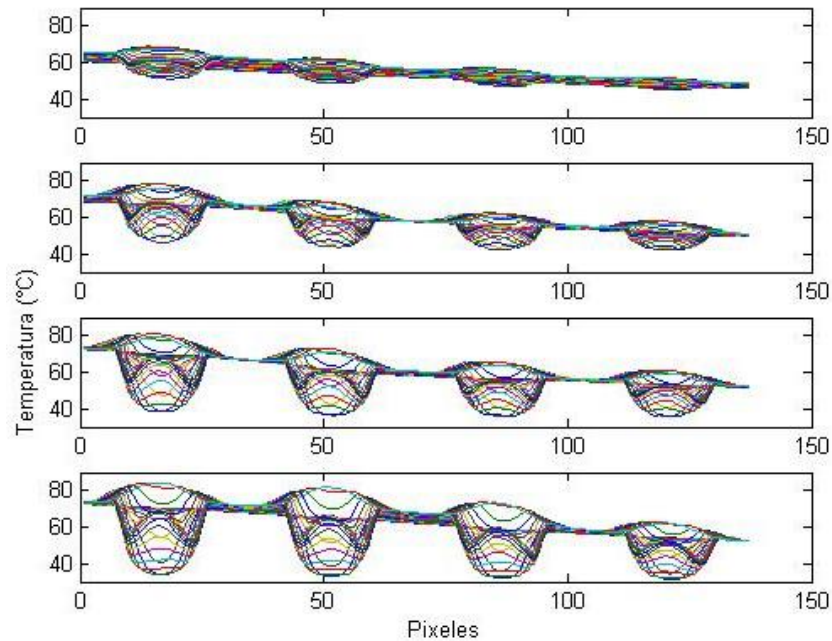


Figura 15. Gráfica de perfiles de temperatura de las secciones (**reflexión**).

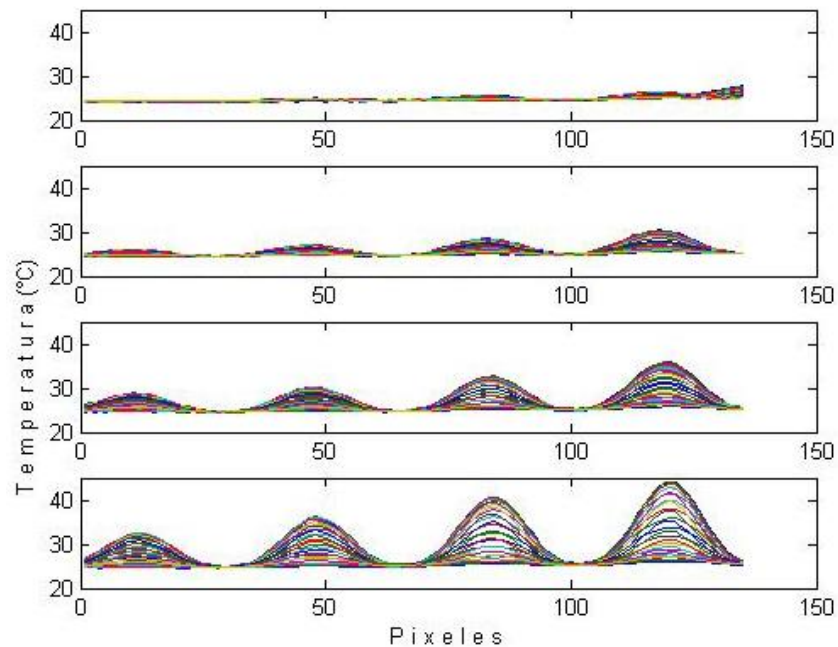


Figura 16. Gráfica de los perfiles de temperatura de las secciones (**transmisión**).

Las gráficas de las secciones tanto en modo reflexión como en modo transmisión permiten observar que la sección inferior posee las imperfecciones con mayor profundidad, y van disminuyendo a medida que hay un acercamiento a la sección superior. Ahora bien, para la parte superior (sección de defectos menos profundos) es evidente que el modo que provee una mejor visibilidad y

acercamiento es el de reflexión, que en contraste con transmisión provee mayor información sobre qué imperfecciones tienen mayor profundidad.

4. Conclusiones

- ✓ La evolución de la temperatura en el tiempo, tanto para reflexión como transmisión, mostraron el comportamiento esperado, es decir, con diferencias entre zonas sanas y defectuosas. Fue entonces posible modelar efectivamente con polinomios de grado 4, la curva correspondiente a la representación en el dominio de los logaritmos.
- ✓ El procesamiento de las imágenes evidenció que la adquisición en modo reflexión en termografía TRIR es mucho más exacta y precisa para el cálculo del diámetro y permite ver un mayor número de imperfecciones, a diferencia del modo transmisión que revela menos defectos y además imprecisa e inexacta.
- ✓ En el análisis cualitativo de la profundidad, las imágenes de la adquisición en reflexión y transmisión revelan notoriamente la mayoría de las imperfecciones. Además es posible apreciar que en cada sección existen imperfecciones más profundas que otras, por lo cual si no se desea conocer el valor de la profundidad sino solamente cuáles tienen un valor mayor que otras, basta con la implementación de TRIR y el análisis de perfiles de temperatura en cada sección.

5. Referencias

- [1] H.S Carslaw and L.C Jaeger. "Conduction of Heat in Solids". Clarendon Press, Oxford, 1986
- [2] J. Maclachlan Spieer, W. Kerns, L. Aamodt and J. Murphy, "Time-resolved infrared radiometry (TRIR) for characterization of impact damage in composite materials", NDT & E International, vol. 26, no. 2, p. 99, 1993.
- [3] R. Osiander and J. Spicer, "Time-resolved infrared radiometry with step heating. A review", Revue Générale de Thermique, vol. 37, no. 8, pp. 680-692, 1998.
- [4]"Introducción a los principios de la termografía", *Fluke.com*, 2017. [Online]. Available: <http://www.fluke.com/fluke/mxes/Accesorios/thermal-imaging-accessories/BOOK-ITP.htm?PID=55774>. [Accessed: 08- May- 2017].